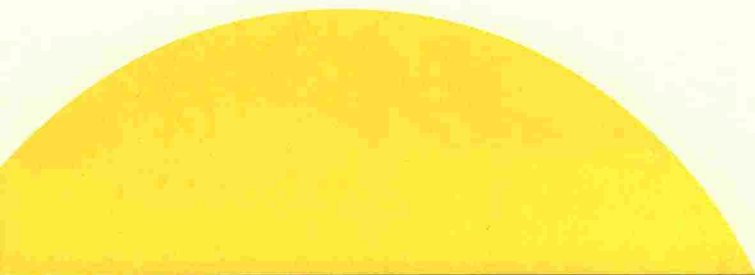
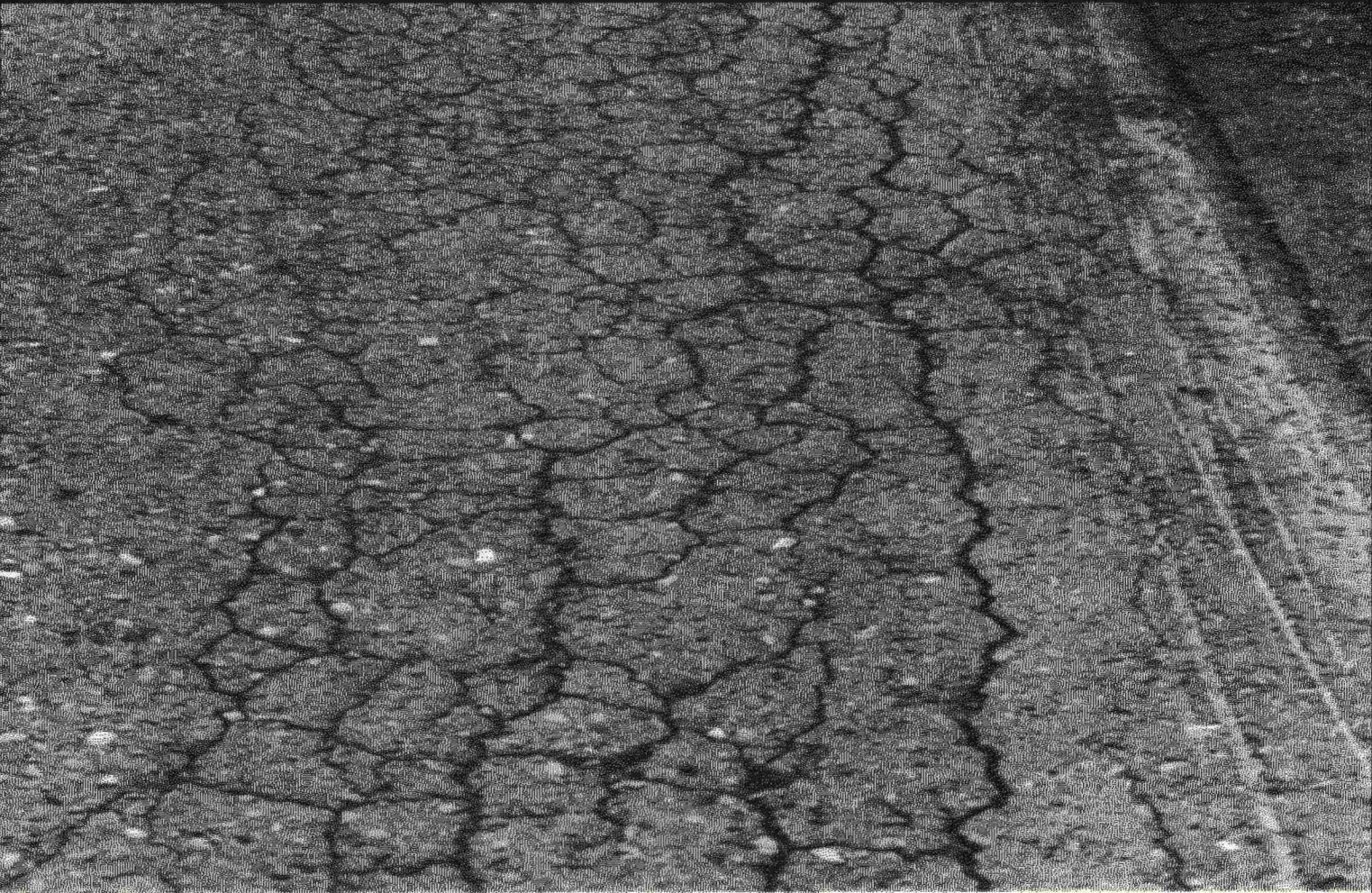


Jouko Belt, Veli Pekka Lämsä, Mika Savolainen, Esko Ehrola

# **Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto**

**Tiehallinnon selvityksiä 15/2002**



**Jouko Belt, Veli Pekka Lämsä, Mika Savolainen, Esko Ehrola**

# **Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto**

**Tiehallinnon selvityksiä 15/2002**



ISSN 1457-9871  
ISBN 951-726-881-5  
TIEH 3200747

Edita Prima Oy  
Helsinki 2002

Julkaisua myy/saatavana:  
Tiehallinto, julkaisumyynti  
faksi 0204 22 2652  
e-mail [julkaisumyynti@tiehallinto.fi](mailto:julkaisumyynti@tiehallinto.fi)  
[www.tiehallinto.fi/julk2.htm](http://www.tiehallinto.fi/julk2.htm)

TIEHALLINTO  
Opastinsilta 12 A  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puhelinvaihde 0204 22 150

## TIIVISTELMÄ

Tämän selvityksen tarkoituksena on kuvata yksinkertaisesti ja havainnollisesti tierakenteiden kuormituskäyttäytymistä ja vaurioitumista sekä tiestön kuntoa. Tierakenteen kuormituskäyttäytyminen ja sitä kautta vaurioituminen on erittäin monisäikeinen kokonaisuus. Tierakenteen kuormituskäyttäytymiseen vaikuttavat tierakenteen ominaisuudet, kuormitukset ja olosuhteet.

Tierakenteen rasituksia ja vaurioitumista aikaansaavia kuormitustekijöitä ovat liikenne- ja ilmastokuormitus sekä rakenteen oma paino. Liikennekuormitus on luonteeltaan lyhytaikaista ja usein toistuvaa, kun taas ilmastokuormitus on vaikutusmekanismiltaan hidasta. Liikenne- ja ilmastokuormitukset vaikuttavat osittain yhtäaikaisesti toistensa vaikutuksia lisäten.

Liikenteen aiheuttama tiestön rasitus on kasvanut 1990-luvulla voimakkaasti, vaikka kuljetussuorite ei ole juurikaan lisääntynyt. Tämä johtuu siitä, että kuormakoko on kasvanut ja kuljetuksissa käytetään entistä raskaampaa kalustoa. Lisäksi leveiden yksittäisrenkaiden käyttö paripyörien sijasta on yleistynyt, mikä on lisännyt tierasitusta. Jos tulevaisuudessa kuljetussuorite lisääntyy ja siirtyminen yhä raskaampaan kalustoon jatkuu, tulee tiestön rasitus lisääntymään erittäin voimakkaasti.

Tierakenteen vauriot näkyvät tien pinnalla päällystehalkeamina sekä pituus- ja poikkisuuntaisena epätasaisuutena. Näihin johtavia syitä ovat mm. päällysteen väsymishalkeilu, pysyvät muodonmuutokset, epätasaiset routanousut, pakkas- ja heijastushalkeilu sekä nastarenkaiden aiheuttama kuluminen.

Koska sekä kuormitukset että rakenteet vaihtelevat tiestöllä huomattavasti, myös tierakenteiden kuormituskäyttäytyminen ja sitä kautta vaurioitumismekanismit ovat erilaisia. Paksupäällysteisillä (> 80 mm) vahvarakenteisilla teillä, joilla liikennemäärät ovat suuria, tärkeimmät vaurioitumisen syyt ovat nastarengaskuluminen ja päällysteen väsymishalkeilu. Ohutpäällysteisillä vähäliikenteisillä teillä tärkeimmät vauriot ovat puolestaan pysyvät muodonmuutokset ja niistä johtuva urautuminen sekä alusrakenteen routimisen aiheuttamat päällystehalkeamat ja pituussuuntainen epätasaisuus.

Olosuhteiden vaihtelun vuoksi tierakenteen vaurioituminen vaihtelee eri vuodenaikoina huomattavasti. Liikennekuormituksen aiheuttama vaurioituminen painottuu sulaan kauteen ja erityisesti kevääseen, jolloin tierakenne on routan sulamisen vuoksi heikoimmillaan johtuen ylimääräisestä kosteudesta ja routineen alusrakenteen alentuneesta tiiviydestä. Talvella syntyvät vauriot, kuten halkeamat ja pituussuuntainen epätasaisuus, johtuvat pääasiassa alusrakenteen routimisen aiheuttamista epätasaisista routanousuista ja lämpötilamuutosten aiheuttamasta päällysteen kutistumisesta.

Päällystetyn tiestön kunto on tällä hetkellä keskimäärin suhteellisen hyvä, mutta varsinkin ohutpäällysteisellä tiestöllä on osuuksia, jotka ovat erittäin



huonossa kunnossa. Pituus- ja poikkisuuntaisen epätasaisuuden osalta tiestöllä ei ole tapahtunut heikkenemistä viime vuosina. Sen sijaan pituus- ja poikkisuuntaiset halkeamat ovat lisääntyneet, mikä nopeuttaa tiestön rakenteellisen kunnan rappeutumista. Jos päällystetyn tiestön kunto halutaan pitää nykyisellä tasolla, ylläpito- ja korjaustoimenpiteitä tulee lisätä.

**Keywords:** pavement, deterioration, condition, loading

## ABSTRACT

The aim of this report is to describe the effects of various loadings on the behaviour and deterioration of road structures and to present the condition of the Finnish paved road network. The behaviour of a road structure is a very complex system which is affected by climatic conditions, loading and the initial characteristics of the structure itself.

The loading caused by traffic, climate and the weight of the structure are the primary factors affecting the stresses and deterioration observed in a road structure. Traffic loading can be characterised as frequent but of short duration, whereas the climatic load and the weight of the structure are long-term loadings. All the loads operate simultaneously to some extent, amplifying each other's impacts.

Although the total haulage distance covered by heavy transport vehicles has increased very little over the last decade, the loading on the road network caused by them has grown considerably, as a result of the increased weight of goods carried and the use of heavier vehicles. If this trend continues, the loading on the road network caused by heavy traffic will increase still more sharply.

The deterioration in the road structure will take the form of pavement cracks and transversal or longitudinal surface roughness. The failure mechanisms causing damage to the road surface include asphalt fatigue, permanent deformations, uneven frost heave, thermal stresses and rutting caused by the studded tyres.

Because of differences in loads, climatic conditions and structures, the failure mechanisms affecting road structures vary in different parts of the road network. On the main roads, with a bound layer over 80 mm thick, the most significant failure mechanisms are fatigue cracking and rutting caused by studded tyres. The typical failures on thinly paved, low volume roads are permanent deformation of the unbound layers, causing rutting, cracks brought by uneven frost heave and longitudinal unevenness.

Because of differences in climatic conditions, deterioration in the road structure varies significantly between seasons. The traffic loading has most influence in the spring thawing period, when the high moisture content of unbound road structures and the low density of the subgrade weaken the resistance to deformation. The most typical failures in the winter time are thermal cracking and cracking caused by uneven frost heave.

The condition of the paved road network in Finland is relatively good on average, but there are some roads that are in very poor condition, especially among the lower grades in the network. Little change has taken place in the incidence of longitudinal or transversal unevennesses during the last dec-



ade, but the amounts of transversal and longitudinal cracks have increased considerably, which will accelerate structural deterioration. If the intention is to maintain or improve the service standard of the road network, the resources available for road maintenance and rehabilitation will have to be increased.

## ALKUSANAT

Tierakenteen kuormituskäyttäytymiseen ja vaurioitumiseen vaikuttavat tierakenteen ominaisuudet ja liikennekuormitukset sekä myös olosuhteet muodostaen vaikeasti hallittavan kokonaisuuden. Monisäikeisen asiakokonaisuuden hahmottamista on vaikeuttanut tiealalla toimivien keskuudessa havainnollisen suomenkielisen yhtenäisen kuvauksen puuttuminen. Yhteisen "kielen" puuttuminen on vaikeuttanut tierakenteisiin liittyvien asioiden käsitteilyä sekä tieammattilaisten keskuudessa että kanssakäymisessä päättäjien kanssa.

Eri tyyppisten tierakenteiden toiminnan ja vauriomekanismien hallinta on edellytys esimerkiksi vertailtaessa rakennevaihtoehtojen edullisuutta, koska vaurioitumisesta riippuva tierakenteen kestoikä on yksi tärkeimmistä elinkaarikustannuksiin vaikuttavista tekijöistä. Myös laatutekijöiden arvottaminen edellyttää tierakenteiden käyttäytymisen tuntemista.

Tiehallinnon toimeksiannosta Oulun yliopiston Rakentamisteknologian tutkimusryhmässä on laadittu selvitys, johon on koottu tämänhetkinen perustietämys tierakenteen toiminnasta ja vaurioitumisesta sekä päällystetyn tien nykykunnosta. Raportin ovat kirjoittaneet TkL Jouko Belt, DI Veli Pekka Lämsä, DI Mika Savolainen ja prof. Esko Ehrola. Lisäksi raportin laadintaan on osallistunut merkittävässä määrin asiantuntemuksellaan Aarno Valkeisenmäki Tieliikelaitoksesta.



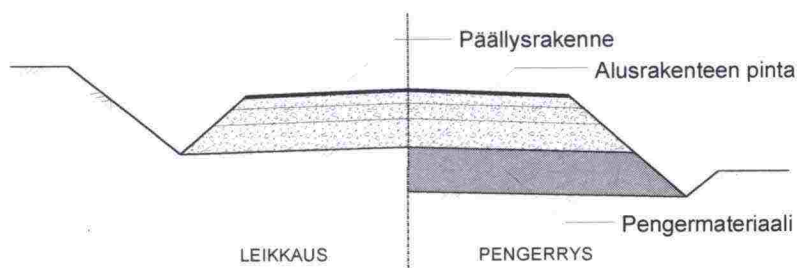
## SISÄLTÖ

1	TIERAKENNE	11
1.1	Tien rakennekerrokset	11
1.2	Päällysrakennemateriaalit	12
1.3	Suomen tiestön rakennehistoria	14
2	TIETÄ KUORMITTAVAT TEKIJÄT	17
2.1	Liikennekuormitus ja sen kehitys	17
2.2	Ilmastokuormitus	20
3	TIERAKENTEEN TOIMINTA	23
3.1	Toiminnan perusteet	23
3.2	Tierakenteen toiminta liikennekuormituksessa	24
3.3	Tierakenteen toiminta ilmastokuormituksessa	26
4	RAKENNEKERROSTEN OMINAISUUDET JA TOIMINTA	28
4.1	Kuormituskäyttäytymisen perusteet	28
4.2	Bitumilla sidotut kerrokset	29
4.2.1	Sideaineet ja kerrosten koostumus	29
4.2.2	Bitumilla sidottujen kerrosten kuormituskäyttäytyminen	30
4.3	Sitomattomat kerrokset ja alusrakenne	32
4.3.1	Palautuva muodonmuutoskäyttäytyminen	32
4.3.2	Pysyvä muodonmuutoskäyttäytyminen	35
4.3.3	Materiaaliominaisuuksien ja olosuhteiden merkitys muodonmuutoksiin	36
5	PÄÄLLYSTETYN TIESTÖN VAURIOT JA KUNTO	39
5.1	Vauriotyypit ja kunnon arviointi	39
5.2	Vaurioituminen ja vaurioiden määrät	41
5.2.1	Verkkohalkeamat	41
5.2.2	Poikkisuuntainen epätasaisuus	45
5.2.3	Pituussuuntainen epätasaisuus	49
5.2.4	Routanousujen aiheuttamat halkeamat	52
5.2.5	Pakkaskatkot	56
5.2.6	Heijastushalkeilu	58
5.2.7	Muut vauriot	59
5.2.8	Vauriosumma	60
5.3	Tiestön kunto ja sen kehittyminen	60
5.4	Vaurioiden merkitys	61
5.4.1	Tien toiminnallinen ja rakenteellinen kunto	61
5.4.2	Vaurioiden liikenteellinen merkitys	62
5.4.3	Vaurioiden rakenteellinen merkitys	64
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	67
7	KIRJALLISUUSLUETTELO	69

## 1 TIERAKENNE

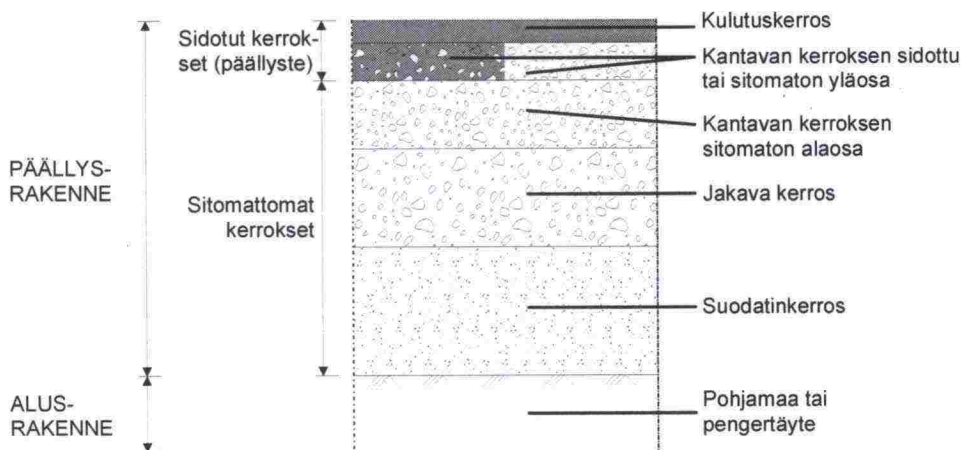
### 1.1 Tien rakennekerrokset

Tierakenne koostuu syvyysuunnassa kahdesta pääosasta; alusrakenteesta ja päällysrakenteesta (kuva 1). Alusrakenteen tulee muodostaa riittävän tasalaatuinen, kantava ja painumaton alusta päällysrakenteelle. Päällysrakenne on alusrakenteen päälle tuleva rakenne, jonka tehtävänä on ottaa vastaan liikenteen kuormitukset ja jakaa ne alusrakenteelle mahdollisimman tasaisesti laajalle alueelle. Lisäksi päällysrakenteen tulee rajoittaa ja pienentää routanousuja.



Kuva 1. Päälly- ja alusrakenne.

Suomessa yleisimmin käytetty päällysrakennetyyppi, ns. joustava päällysrakenne (flexible pavement), on kerroksellinen rakenne, jossa ylimpänä on bitumisella sideaineella sidottu joustava kerros eli päällyste muiden rakennekerrosten ollessa sitomattomia (kuva 2). Sidottuja kerroksia ovat tavanomaisessa rakenteessa kulutuskerros ja usein myös kantavan kerroksen yläosa.



Kuva 2. Tavanomainen joustava päällysrakenne.

Sitomattomat kerrokset ovat kantava kerros (kantavan kerroksen alaosa), jakava kerros ja suodatinkerros. Jakavan ja suodatinkerroksen tarpeellisuus riippuu alusrakenteen laadusta. Suodatinkerros tarvitaan aina, kun alusrakenteen materiaali on routivaa.



Kulutuskerroksen toiminnallisena tehtävänä on muodostaa pinta, joka on turvallinen, miellyttävä ja taloudellinen ajaa. Kulutuskerroksen rakenteellisenä tehtävänä on puolestaan muodostaa rakenteelle vettä pitävä katto eli minimoida veden pääsy tierakenteeseen. Kulutuskerros lisää myös päällysrakenteen yläosan jäykkyyttä.

Kantavan ja jakavan kerroksen tehtävä on muodostaa päällysteelle niin kantava (jäykkä) alusta, etteivät liikennekuormituksen aiheuttamat rasitukset päällysteessä kasva liian suuriksi. Lisäksi kerrosten tulee jakaa liikennekuormat niin, etteivät alusrakenteen rasitukset muodostu liian suuriksi. Jakavalla kerroksella pyritään myös kuivattamaan kantavaa kerrosta.

Suodatinkerroksen tehtävänä on estää päällysrakenteen ja alusrakenteen materiaalien sekoittuminen keskenään sekä katkaista veden kapillaarinen nousu alusrakenteesta ylempiin rakennekerroksiin. Lisäksi suodatinkerros kasvattaa routimatonta päällysrakennepaksuutta, mikä vähentää alusrakenteen routimisesta johtuvia routanousuja.

## 1.2 Päällysrakennemateriaalit

Sidotuista ja sitomattomista materiaaleista tehtyjen päällysrakennekerrosten peruserona on se, että sidotut kerrokset voivat ottaa vastaan vetorasituksia, kun taas sitomattomilta materiaalikerroksilta tämä ominaisuus puuttuu. Sidottujen kerrosten vetolujuusominaisuuksia voidaan parhaiten hyödyntää tierakenteen yläosassa, missä vetojännitykset ovat suurimmillaan.

Sidotut kerrokset ovat myös jykkiä, minkä vuoksi ne pienentävät liikennekuormituksesta alla oleviin kerroksiin välittyviä pystysuoria jännityksiä ja jakavat jännitykset laajemmalle alueelle kuin sitomaton materiaalikerros. Periaatteessa mitä jykempi kerros on sitä laajemmalle alueelle se välittää rasituksia alempana oleviin kerroksiin, mikä pienentää maksimi rasituksia.

Sidottujen kerrosten sideaineena on pääasiassa bitumi. Bitumilla sidottujen kerrosten eli asfalttien laatu riippuu kerroksen sijainnista tierakenteessa sekä liikenteen koostumuksesta ja määrästä (taulukko 1). Kulutuskerros, sidekerros sekä kantava kerros tai sen yläosa tehdään usein asfalttibetonista. Asfalttibetoni on yleinen massatyyppejä myös massapintauksissa, tasauksissa ja paikkauksissa [PANK ry., 2000]. Kivimastiksiasfaltti on hyvin nastarengaskulutusta kestävä. Koska kiviaineksen lujuus vaikuttaa ratkaisevasti päällysteen kulumiskestävyyteen, SMA:n kiviainekselta vaaditaan hyvää lujuutta.

*Taulukko 1. Asfalttityypit ja niiden käyttökohteet.*

Asfalttityyppi	Lyhenne	Käyttökohte
Asfalttibetoni	AB	
- Kulutuskerroksen asfalttibetoni	AB	Liikennemäärältään eriluokkaiset tiet lukuunottamatta kaikkien suurimpia liikennemääriä
- Sidekerroksen asfalttibetoni	ABS	Tiet, missä on erittäin paljon raskasta liikennettä
- Kantavan kerroksen asfalttibetoni	ABK	Asfalttipäällysteiset tiet lukuunottamatta vähäliikenteisiä teitä
Kivimastiksiasfaltti	SMA	Kulutuskerros teillä, missä liikennemäärät ovat suuria
Pehmeä asfalttibetoni	PAB	Kulutuskerros alemman luokan teillä Kaksi alatyyppeä: PAB-B (entinen kevyt asfalttibetoni eli KAB) ja PAB-V (öljysoran kaltainen)
Bitumistabilointikerros	BST	Kantava kerros

Kantava kerros tai sen yläosa voidaan stabiloida bitumilla käyttäen bitumiemulsio-, vaahtobitumi- tai Remix-stabilointimenetelmää. Bitumistabilointia käytetään lähinnä rakenteen parantamismenetelmänä, missä yleensä vanha kulutuskerros ja sitomattoman kantavan kerroksen yläosa stabiloidaan paikallasekoitusmenetelmällä.

Kantava tai jakava kerros voidaan sitoa myös hydraulisella sideaineella, jolloin rakenteesta käytetään nimitystä puolijäykkä päällysrakenne (semi-rigid pavement). Hydraulisena sideaineena käytetään yleisimmin sementtiä, maasuunihiekkaa tai näiden yhdistelmää.

Tavanomaisessa joustavassa päällysrakenteessa on yleensä useita sitomattomia kerroksia, joissa voidaan käyttää erilaatuisia materiaaleja. Kaikkein laadukkainta materiaalia tarvitaan sitomattomassa kantavassa kerroksessa, missä liikennekuormituksen aiheuttama rasisitus on suurin. Alempina tierakenteessa voidaan käyttää ylempiä kerroksia heikompia materiaaleja.

Sitomattoman kantavan kerroksen materiaali on lähes aina murskattua. Materiaalin kelpoisuuteen vaikuttavat murskautuneisuus (soramurskeilla), rakeisuus, hienoainespitoisuus, lujuus ja raemuoto. Jakava kerros tehdään luonnonsorasta tai murskatusta kiviaineksesta. Jakavan kerroksen materiaalin kelpoisuuteen vaikuttavat lähinnä rakeisuus ja hienoainespitoisuus. Suodatinkerros tehdään yleensä hiekasta, jonka on täytettävä tietyt rakeisuus- ja kapillaarisuusvaatimukset. Lisäksi suodatinkerroksen rakeisuuden tulee olla sellainen, ettei synny sekoittumisvaaraa jakavan kerroksen tai alusrakenteen materiaalin kanssa. Suodatinkerroksen kuten muidenkin sitomattomien kerrosten materiaalien tulee olla routimatonta.



### 1.3 Suomen tiestön rakennehistoria

Sotien ja sotakorvauskauden seurauksena Suomen tiestö oli 1950-luvun alkupuolella todella huonossa kunnossa. Samanaikaisesti yhteiskunnan kannalta tärkeässä puutavaran kuljetuksessa alettiin siirtyä myös pitkillä matkoilla kuorma-autokuljetuksiin. Tämän seurauksena tiestön kunnostamisesta ja rakentamisesta tuli yhteiskunnan kehittymisen kannalta keskeinen tekijä. Tiestön kunnostaminen ja rakentaminen käynnistyi suuressa mittakaavassa 1950-luvun loppupuolella [Masonen ja Hänninen, 1995]. Tiestön kehittäminen jatkui voimakkaana aina 1990-luvun lamavuosiin saakka (taulukko 2).

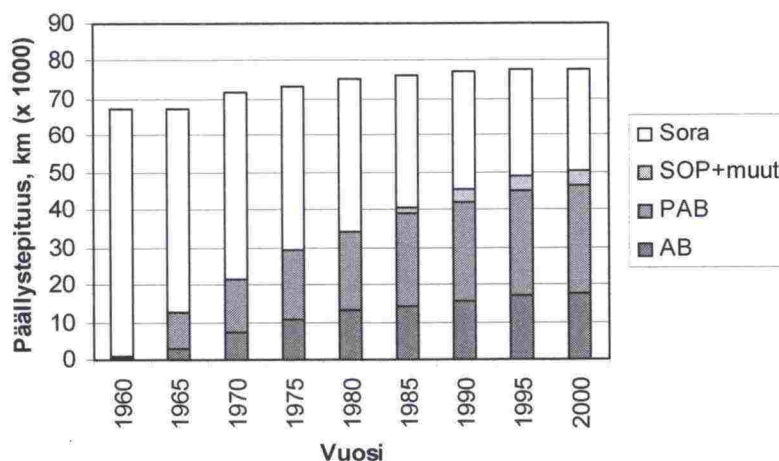
*Taulukko 2. Tiestön tila ja kehittäminen eri vuosikymmenillä.*

Vuosikymmen	Tiestön tila ja kehittäminen
50-luku	Tiestö on huonokuntoinen ja lähes kaikki tiet ovat sorapintaisia. Päätieverkon kunnostaminen ja päällystäminen alkaa.
60-luku	Laajamittainen päällystäminen aloitetaan. Vain päätiet rakennetaan hyvin. Muulla tieverkolla päällystäminen tehostettuna kunnossapitona; soratien päälle 20-40 cm soraa + 5 cm öljysoraa. Ensimmäiset moottoritiet valmistuvat.
70-luku	Laajamittainen päällystäminen jatkuu. Aiemmin päällystettyjen teiden rakenteen parantaminen aloitetaan. Asfalttipäällysteitä uusittaessa tasausmassa + noin 100 kg/m <sup>2</sup> uutta päällystettä. Ensimmäiset moottoriliikennetiet valmistuvat.
80-luku	Laajamittainen päällystäminen jatkuu. Päätieverkon parantamistyöt saadaan pääosin valmiiksi. Paljon rakenteenparantamishankkeita. Asfalttipäällysteitä uusittaessa tasausmassa + noin 100 kg/m <sup>2</sup> uutta päällystettä. Nastarenkaat urauttavat nopeasti vilkasliikenteisiä teitä.
90-luku	Kehittämistoimenpiteet keskitetään vilkasliikenteiselle päätieverkolle. Muulla tiestöllä tehdään vain kevyitä korjaustoimenpiteitä vähäliikenteisimmän päällystetyn tiestön jäädessä korjaustoiminnan ulkopuolelle. Asfalttipäällysteitä uusitaan ohuilla pintauksilla.

Vuonna 1960 yleisten teiden pituus oli runsaat 67 000 km ja lähes koko tiestö oli sorapintaista (kuva 3). Vuonna 2000 yleisten teiden pituus oli vajaat 78 000, mistä oli päällystetty lähes kaksi kolmasosaa. Tällä hetkellä päällystetty tiestö on tasaisuudeltaan suhteellisen hyvässä kunnossa lukuun ottamatta alinta tieverkkoa. Sen sijaan pituus- ja poikkisuuntaiset halkeamat ovat selvästi lisääntyneet myös ylemmällä tieverkolla.

Tien rakenteen ensimmäiset varsinaiset suunnitteluohjeet julkaistiin vasta vuonna 1964 ja uusittiin kokonaisuudessaan vuonna 1985. Tällöin tien rakenteellinen suunnittelu pohjautui ensimmäistä kertaa sekä kantavuus- että routamitoitukseen. Kantavuusmitoituksen lähtökohtina ovat tavoitekantavuus, alustan kantavuus ja rakennusmateriaalien laatu (moduulit), joiden pohjalta määritetään rakennekerrosten paksuudet. Kantavuusmitoitustamismenetelmä on periaatteessa iteratiivinen eli kokeillaan erilaisia päällysrakenne-

vaihtoehtoja ja määritetään Odemarkin mitoitussyhtälöllä (kaksikerroskaavalla) saavutettavat kantavuudet, joita verrataan kuormituskertaluvun edellyttämään päällysrakenneluokasta riippuvaan tavoitekantavuuteen. Vaihtoehtoisesti käytetään päällysrakenneluokakohtaisia rakennetaulukkoja [Tie- ja vesirakennushallitus, 1985].

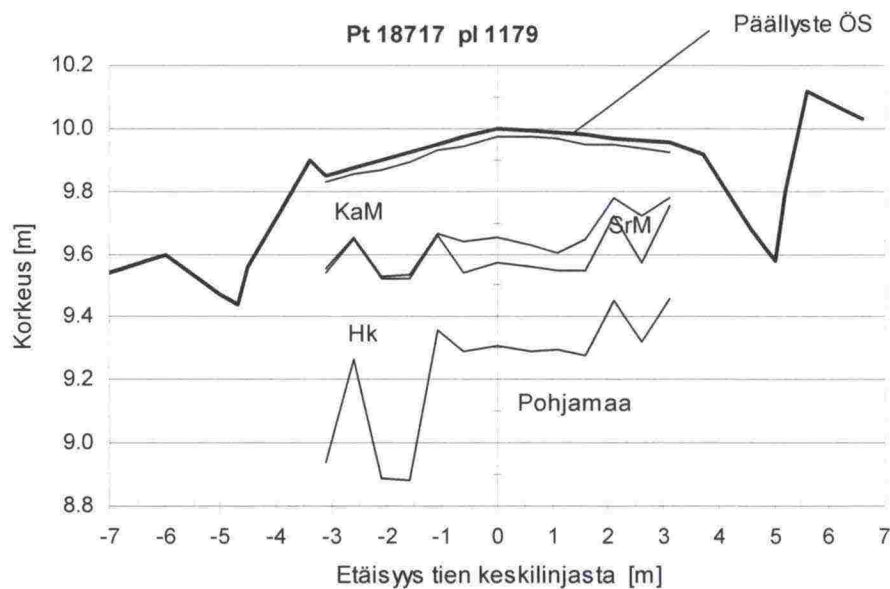


Kuva 3. Yleisten teiden pituus päällystetyypeittäin vuosina 1960-2000 [Tiehallinto, 2001].

Routamitoituksen lähtökohtina ovat tien vaatimustaso, routaolosuhteet ja mitoituspakkasmäärä, joiden pohjalta valitaan taulukosta routimattomien rakennekerrosten yhteispaksuus. Tien vaatimustaso riippuu tien toiminnallisesta luokasta, liikennemäärästä ja päällystetyypistä. Routiva alusrakenne jaetaan tasalaatuisuuden ja pohjaveden korkeuden perusteella routaolosuhteiltaan kolmeen perustyyppiin: helpot, keskivaikeat ja vaikeat. Mitoituspakkasmäärä edustaa tilastollisesti kerran kymmenessä vuodessa toistuvaa pakkasmäärää.

TPPT- ja Kevytpäällyste-projektien valmistumisen myötä tiesektorilla ollaan siirtymässä kuormituskestävyyden mitoituksessa mekanistis-empiirisiin menetelmiin. Routamitoitus puolestaan tulee pohjautumaan alusrakenteen routimiskertoimeen (segregaatiopotentiaaliteoriaan) pohjautuviin laskelmiin.

Huolimatta vuosien 1964 ja 1985 suunnitteluohjeista karkeasti arvioiden ainoastaan puolet päällystetystä tiestöstä on rakennettu niiden mukaisesti osan ollessa jopa ns. rakentamattomia teitä (kuva 4). Ongelma on suurin vanhoilla sorateilla, joihin on vähäisten resurssien vuoksi ennen päällystämistä lisätty ainoastaan hieman luonnonsoraa tai murskattua materiaalia. Teiden leventämisessä on puolestaan menetelty usein siten, että on ainoastaan lisätty materiaalia parannettavan tien reunoille, jolloin tierakenne on muodostunut poikkileikkaukseltaan epähomogeeniseksi.



Kuva 4. Esimerkki rakentamattoman tien kerrosrajoista tien poikkisuunnassa [Lämsä, 1999].

Yleistä on ollut myös se, että parantamistoimenpiteiden yhteydessä on lisätty sitomatonta materiaalia vanhan käsittelemättömän päällysteen päälle. Tällöin on synnytetty ongelmallinen sekarakenne, missä vanha päällyste on rakenteen sisällä.

Em. rakenteet, joiden kuormituskestävyys on puutteellinen, eivät täytä nykyisin rakentamiselle asetettuja vaatimuksia, mutta ne ovat siitä huolimatta tien kunnossapidäjän ja käyttäjän kannalta jokapäiväisiä käytön kohteita.

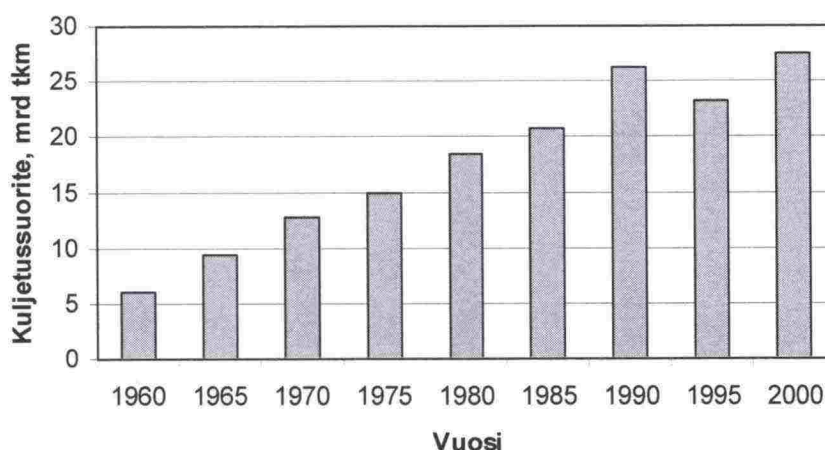


## 2 TIETÄ KUORMITTAVAT TEKIJÄT

### 2.1 Liikennekuormitus ja sen kehitys

Tierakenteen kuormituskestävyyden ja rakenteellisten vaurioiden kannalta merkittävin liikennekuormitus on raskaan liikenteen aiheuttamaa. Henkilöautoliikenteen aiheuttamat rasitukset näkyvät tiestöllä ainoastaan nastarenkaiden seurauksena syntyvinä päällysteen kulumisurina.

Taloudellisen kehityksen myötä tieliikenteen kuljetussuorite on kasvanut tasaisesti vuodesta 1960 lähtien lukuun ottamatta 1990-luvun lamaa (kuva 5). Vuonna 2000 kuljetussuorite oli lähes viisinkertainen vuoteen 1960 verrattuna, mutta 1990-luvulla kuljetussuorite kasvoi ainoastaan 5 prosenttia. Raskaan liikenteen tiestölle aiheuttama rasitus kasvoi kuitenkin myös 1990-luvulla merkittävästi.



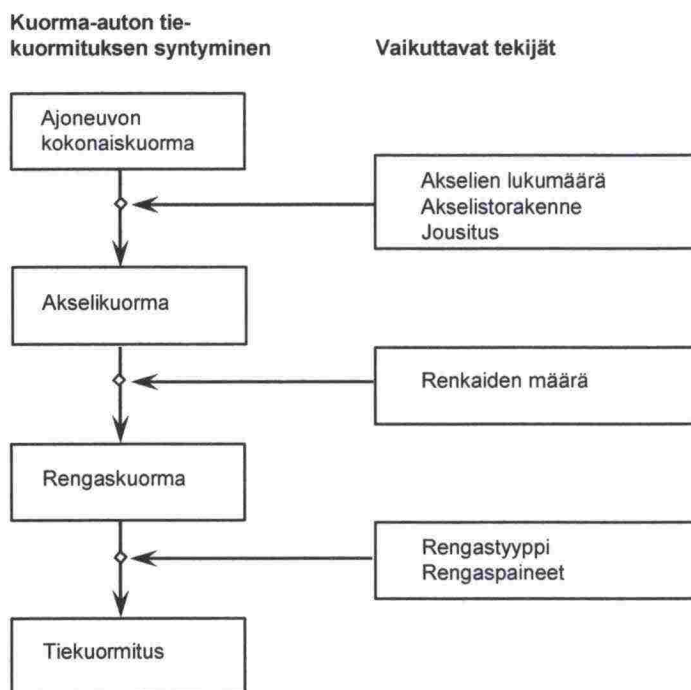
Kuva 5. Kotimaan tieliikenteen kuljetussuorite vuosina 1960-2000 [Tiehallinto, 2001].

Kuljetuksissa on siirrytty käyttämään raskaampaa kalustoa kuin aikaisemmin (taulukko 3). Tämä johtuu mm. lainsäädännön muutoksista ja ajoneuvotekniikan kehityksestä. Nykyisin kuljetuksissa käytetään myös enemmän perävaunullisia kuorma-autoja kuin aikaisemmin. Samanaikaisesti ajoneuvotyyppien keskimääräiset kokonaismassat ovat kasvaneet merkittävästi.

Taulukko 3. Liikennesuoritteiden jakauma ajoneuvotyypeittäin ja keskimääräiset kokonaismassat vuosina 1986 ja 1999 [TVH, 1987, Tielaitos, 2000].

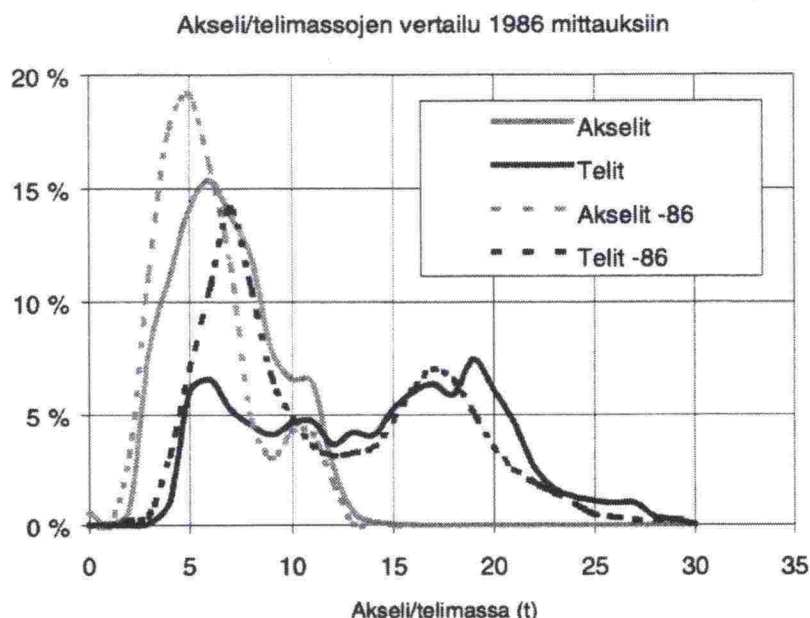
Autotyyppi	Liikennesuoritteiden jakauma, %		Kokonaismassa, t	
	1986	1999	1986	1999
KAIP	40	25	11.0	12.9
KAPP	11	19	24.1	28.1
KAVP	49	56	33.8	41.9
Keskiarvo			23.7	32.1

Liikennekuormituksen aiheuttaman rasittavuuden arvioinnissa on otettava kokonaismassan lisäksi huomioon akseli- ja rengaskuormat (kuva 6). Vuosien 1986 ja 1999 välillä kaikkien raskaiden autotyyppien akselimäärät ovat keskimäärin selvästi lisääntyneet. Esimerkiksi varsinaisiin perävaunuyhdistelmiin on 5- ja 6-akselisen kaluston tilalle tullut 6- ja 7-akselinen kalusto. Myös 2- ja 3-akselisten telien ja ilmajousituksen käyttö on yleistynyt [Tielaitos, 2000].



Kuva 6. Ajoneuvon tiehen aiheuttaman rasituksen syntyminen ja vaikuttavat tekijät [Ehrola, 1996].

Huolimatta autotyyppien akselimäärien lisääntymisestä yksittäis- ja teliakselien massat ovat vuosien 1986 ja 1999 välillä selvästi kasvaneet (kuva 7). Erityisen merkittävää on ollut suurimpien massojen kasvu.



Kuva 7. Akseli- ja telimassojen jakaumat vuosina 1986 ja 1999 [Tielaitos, 2000].

Myös rengastuksessa on tapahtunut muutoksia. Vuonna 1986 leveitä yksittäisrenkaita (supersinglejä) käytettiin erittäin vähän, kun taas vuonna 1999 niitä käytettiin noin 15 %:ssa akseleista. Supersinglet (leveys > 350 mm) aiheuttavat paripyörää suuremmat rasitukset rakenteen yläosaan, minkä seurauksena päällysteen rasitukset kasvavat. Myös rengaspaineet ovat kasvaneet ja renkaiden rakenne on muuttunut jäykemmäksi, mitkä lisäävät rengaskuorman rasittavuutta.

Ajoneuvokannan, lainsäädännön ja kuormauksen muutokset vuosien 1986 ja 1999 välillä ovat toisaalta lisänneet ja toisaalta vähentäneet raskaan liikenteen tiestölle aiheuttamaa rasitusta. Akseli- ja kokonaismassojen kasvu, supersinglejen yleistyminen ja rengaspaineiden kasvu sekä renkaiden rakenteen muutokset ovat lisänneet rasittavuutta. Rasittavuutta ovat puolestaan vähentäneet teliakselien ja ilmajousituksen yleistyminen. Kuormakoon kasvu on vähentänyt liikennesuoritetta kuljetettavaa tonnia kohti, mikä sinänsä pienentää tiestön rasitusta.

Ottamalla huomioon edellä mainitut tekijät on määritetty eri autotyyppien kuormitusvastaavuudet eli se, kuinka monta 10 tonnin standardiakselia autotyyppin rasittavuus vastaa. Kuormitusvastaavuudet ovat kasvaneet vuodesta 1986 vuoteen 1999 lukuun ottamatta puoliperävaunullisia kuorma-autoja (taulukko 4).

Kun otetaan huomioon autotyyppien liikennesuoritteissa ja kuormitusvastaavuuksissa tapahtuneet muutokset sekä oletetaan muutokset lineaarisiksi, vuodesta 1990 vuoteen 2000 raskaan liikenteen tiestölle aiheuttama rasitus



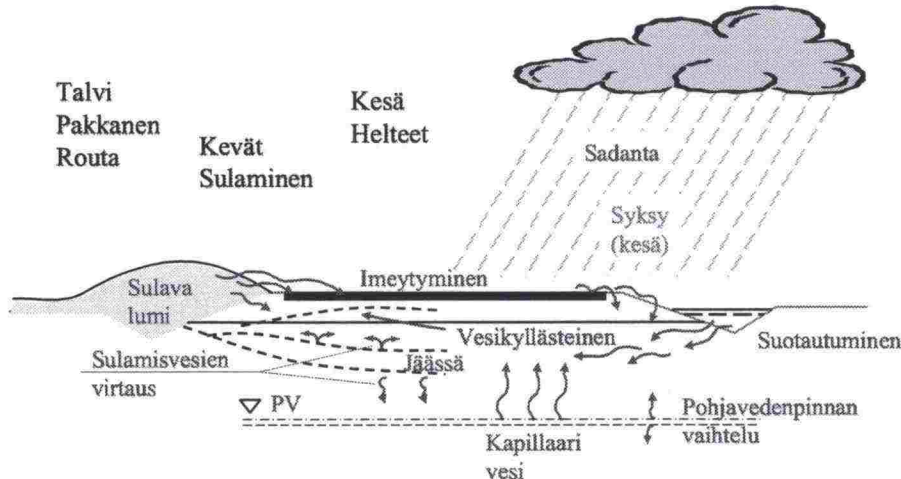
on lisääntynyt runsaat 20 prosenttia. Tulevaisuudessa rasitus tulee edelleen kasvamaan johtuen mm. supersinglejen käytön lisääntymisestä.

Taulukko 4. Autotyyppien kuormitusvastaavuudet vuosina 1986 ja 1999 [Tielaitos, 2000].

Autotyyppi	Kuormitusvastaavuus	
	1986	1999
KAIP	0.4	0.6
KAPP	1.5	1.5
KAVP	2.3	2.6

## 2.2 Ilmastokuormitus

Suomen olosuhteissa ilmastokuormitusten päätekijöitä ovat vuodenaikojen kiertokulkua noudattelevat lämpötila, vesi ja routa (kuva 8). Lämpötilan vaikutus kohdistuu lähinnä sidottuihin rakennekerrokseen ja veden vaikutus puolestaan pääasiassa sitomattomiin kerrokseen. Roudan vaikutukset tierakenteeseen syntyvät alusrakenteen ja sitomattomien rakennekerrosten välityksellä.

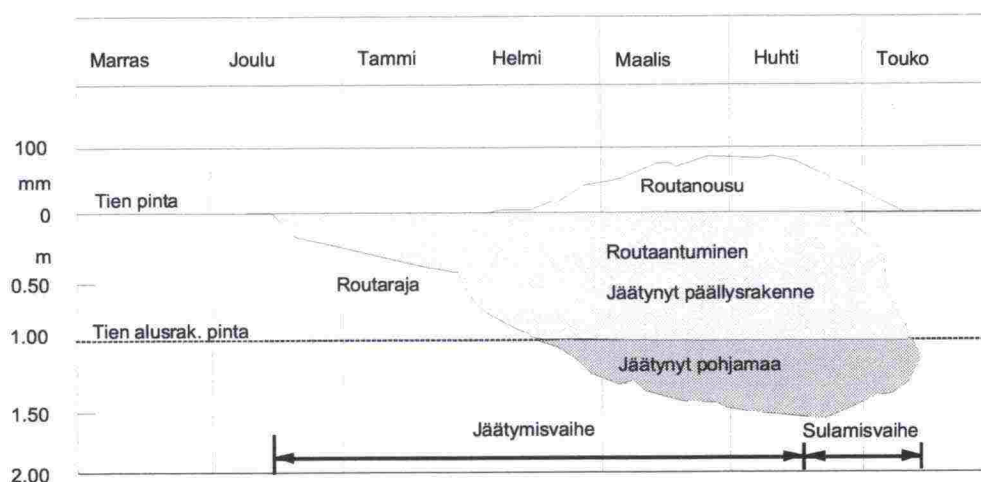


Kuva 8. Ilmastokuormitukset.

Tierakenteessa oleva ylimääräinen kosteus on pääosin peräisin sade- ja sulamisvesistä. Osa sadevedestä imeytyy sorapientareista, tieluiskista tai suoraan päällysteen läpi rakennekerrokseen. Sadevesi vaikuttaa myös pohjaveden pinnan korkeuteen ja sitä kautta varsinkin alusrakenteen vesipitoisuuteen.

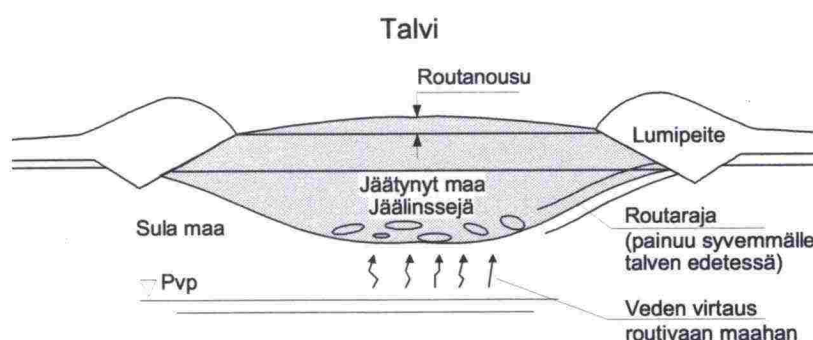
Routaan liittyy kaksi tien toimintaan vaikuttavaa perusilmiötä nimittäin routaantuminen ja routiminen. Routaantumisella ymmärretään tierakenteen jäätymistä ja jäätyminen etenemistä tierakenteessa (kuva 9). Routimisella ym-

märretään sellaista maan jääymistä (routaantumista), minkä yhteydessä maan tilavuus kasvaa ja tilavuuden kasvun seurauksena tapahtuu maarakenteen pinnassa ns. routanousua. Tiessä routanousua alkaa muodostua siinä vaiheessa, kun routiva alusrakenne alkaa jäätyä. Routanousu palautuu alusrakenteen sulaessa.



Kuva 9. Tierakenteen routaantuminen ja routanousu.

Maan tilavuuden kasvu ja routanousu aiheutuvat routimisprosessissa routivaan maahan alapuolisista maakerroksista ja pohjavedestä imeytyvän ja rakenteessa olevan veden jääymisestä (kuva 10). Jäätyvä vesi muodostaa routivaan maahan jäälinssiä, jotka saavat aikaan routanousun [Ehrola, 1996].



Kuva 10. Tien routimisen yleinen kulku [Rahiala, 1988].

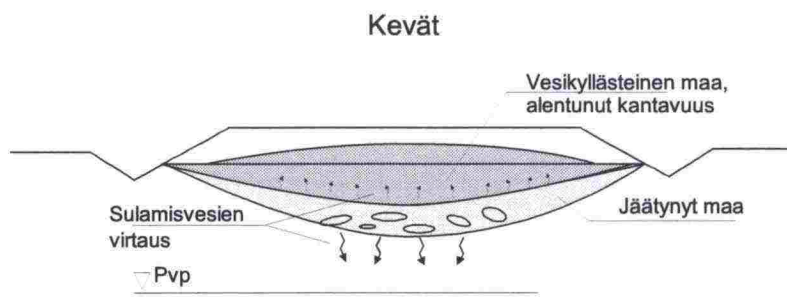
Jotta tiessä tapahtuu routimista, seuraavat kolme perusedellytystä tulee olla voimassa:

- routiva alusrakenne
- alusrakenteen jäätyminen
- saatavilla oleva vesi (eli ylhäällä oleva pohjaveden pinta)

Mikäli jokin näistä edellytyksistä puuttuu tai toteutuu puutteellisesti, routimista ei tapahdu ollenkaan tai routiminen rajoittuu.

Tierakenteessa routimista tapahtuu yleensä vain alusrakenteen osalla, koska tien rakennekerrosten tulisi olla routimattomia. Tierakenne jäätyy tien poikkileikkauksen keskellä syvemmälle kuin reunoilla reunaosia suojaavan lumikerroksen vuoksi. Tällöin routanousut muodostuvat suuremmiksi tien keskiosilla kuin reunoilla (kuva 10).

Keväällä roudan sulaessa routanousu palautuu eli tienpinta laskeutuu takaisin alkuperäiseen asemaan (kuva 11). Tällöin tierakenteeseen vapautuu runsaasti ylimääräistä kosteutta materiaalien sulaessa. Sulamiskauden tilanteen tekee ongelmalliseksi se, että sulaminen alkaa ylhäältä päin. Sulamisrintaman alapuolisen osan ollessa jäässä ylimääräisen veden poistuminen rakenteesta vaikeutuu merkittävästi.



Kuva 11. Roudan sulamisprosessi tierakenteessa [Rahiala, 1988].

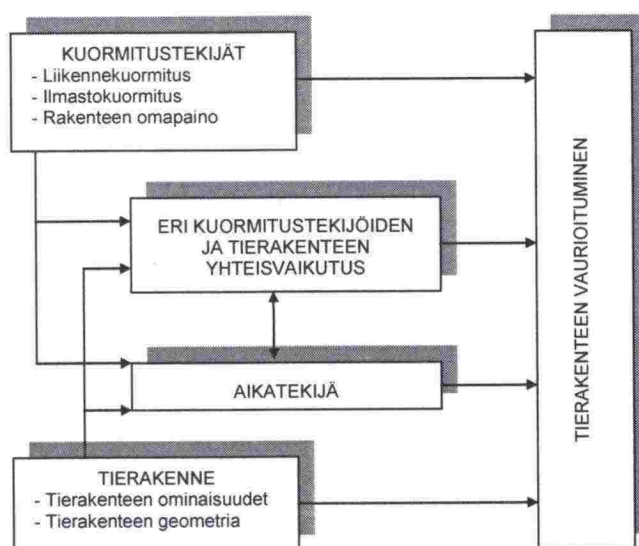
Suomen olosuhteissa varsinkin keväällä tierakenteen yläosa sulaa ja jäätyy useita kertoja [Ryynänen, 2000], mikä lisää päällysteen alapuolisen kerroksen kosteutta, mikä puolestaan alentaa rakenteen kuormituskestävyyttä.



### 3 TIERAKENTEEN TOIMINTA

#### 3.1 Toiminnan perusteet

Tierakenteen ja siinä olevien materiaalien toiminnan kannalta on oleellista, minkälaisia jännityksiä ja muodonmuutoksia kuormitukset saavat aikaan rakenteeseen ja toisaalta miten rakenne ja materiaalit kestävät syntyviä rasituksia. Tierakenteeseen rasituksia aiheuttavia ja sitä kautta vaurioitumista aikaansaavia kuormitustekijöitä ovat liikenne- ja ilmastokuormitus sekä rakenteen omapaino (kuva 12).



Kuva 12. Tierakenteen vaurioitumisen osatekijät [Belt ym., 2000a].

Liikenne- ja ilmastokuormitukset vaikuttavat osittain yhtäaikaaisesti, minkä vuoksi kuormitusten yhteisvaikutuksesta rakenteeseen syntyvä rasitus on suurempi kuin yksittäisen kuormitustyyppin aiheuttama rasitus. Liikenne- ja ilmastokuormitukset poikkeavat luonteeltaan toisistaan. Liikennekuormitus on lyhytaikaista ja usein toistuvaa kuormitusta. Ilmastokuormitus on pääosin vuodenaikojen mukaan toistuvaa ja siten vaikutusmekanismiltaan hidasta.

Tierakenteen kuormituskestävyyden kannalta merkittävin liikennekuormitus syntyy raskaan liikenteen aiheuttamana. Henkilöautoliikenteen rasitukset näkyvät tiestöllä ainoastaan nastarenkaiden synnyttämänä kulumisurina. Ilmastokuormituksen päätekijöitä ovat vuodenaikojen mukaan vaihtuvat lämpötila, kosteusolot ja routa.

Rakenteen omapaino on myös kuormitustekijä, mutta siihen ei juurikaan voida vaikuttaa. Rakenteen omapainon aiheuttamat rasitukset ovat merkittäviä lähinnä pehmeiköillä ja tien kohdissa, missä alusrakenteen laatu vaihtuu.

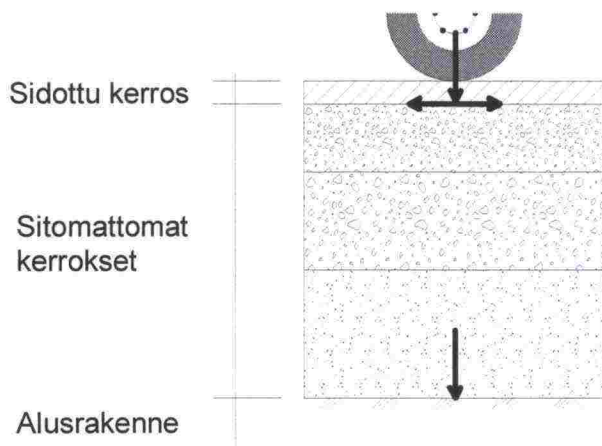
Päällysteen vanheneminen on myös tierakenteen vaurioitumiseen vaikuttava tekijä. Iän myötä bituminen sideaine kovenee, mikä kasvattaa päällysteen jäykkyyttä. Sideaineen koveneminen lisää päällysteen halkeilua. Päällysteen jäykkyyden lisääntyminen puolestaan pienentää liikennekuormituksesta tierakenteeseen aiheutuvia rasituksia.

Jo syntyneillä vaurioilla on myös oma merkityksensä tierakenteen käyttäytymiseen. Tien pintaan syntyvät epätasaisuudet ja vauriot lisäävät liikennekuormituksen dynaamisia rasituksia, mikä saa aikaan sen, että tien vaurioituminen muodostuu itseään kiihdyttäväksi prosessiksi.

Todellisuudessa tierakenteen toiminta ja kunto ovat liikennekuormituksen, ilmasto-olosuhteiden vaihtelun ja ikääntymisen yhteisten vaikutusten seurauksena vähitellen tapahtuvassa, mutta jatkuvassa muutostilassa koko elinkaarensa ajan.

### 3.2 Tierakenteen toiminta liikennekuormituksessa

Tavanomaisella tierakenteella liikenteen kuormituskestävyyden kannalta kriittisiksi tekijöiksi ovat käytännössä osoittautuneet liikennekuormituksesta sidottujen kerrosten alapintaan muodostuvat vetojännitykset ja –muodonmuutokset sekä ylimpään sitomattomaan kerrokseen ja alusrakenteeseen kohdistuvat puristusrasitukset (kuva 13). Sidotun kerroksen alapintaan syntyvät rasitukset ovat yhteydessä kerroksen väsymisvaurioitumiseen. Ylimpään sitomattomaan kerrokseen ja alusrakenteeseen kohdistuvat rasitukset ovat taas yhteydessä rakenteeseen syntyvien pysyvien muodonmuutosten suuruuteen. Tierakennetyyppi määrää, mikä tai mitkä rasitukset ovat kussakin tapauksessa kriittisiä. Esim. ohut- ja paksupäällysteiset tierakenteet toimivat ja sitä kautta vaurioituvat erilailla.



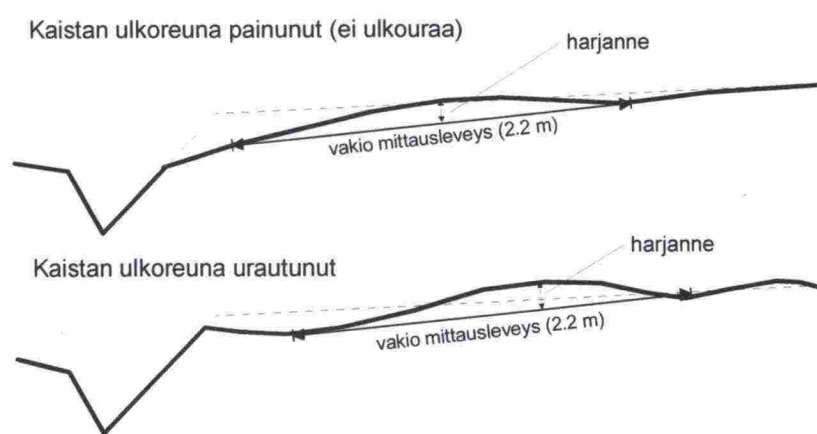
Kuva 13. Tierakenteen kriittiset rasitukset.

### Ohutpäälysteiset tierakenteet

Jos sidottu kerros on ohut ja/tai joustava, sen merkitys koko tierakenteen kuormituskestävyyteen on vähäinen. Tällöin liikennekuormitus aiheuttaa sitomattomaan kantavaan kerrokseen niin suuria rasituksia, että kerrokseen alkaa muodostua pysyviä muodonmuutoksia. Päälysteen ollessa ohut sitomaton kantava kerros on kuormituskestävyyden kannalta tärkein tien rakenteellinen osa. Sen sijaan päälysteen väsyminen ei ole ohutpäälysteisillä tierakenteilla yleensä kriittinen tekijä.

Sitomattomien kerrosten paksuus vaikuttaa alusrakenteeseen syntyviin rasituksiin ja sitä kautta koko tierakenteen toimintaan. Mitä paksumpi on sitomaton päälysrakenne sitä pienemmät ovat liikennekuormituksen aiheuttamat alusrakenteen rasitukset ja niiden aiheuttamat pysyvät muodonmuutokset. Sen sijaan pehmeällä alusrakenteella päälysrakenteen paksuntaminen (painon kasvu) lisää painumia.

Sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen pysyvät muodonmuutokset näkyvät tien pinnalla pääosin poikkisuuntaisena epätasaisuutena. Kapeilla teillä liikennekuormitus välittyy rakenteeseen lähellä tien reunaa aiheuttaen reunan painumista. Tämän seurauksena pysyvät muodonmuutokset eivät ilmene kokonaisuudessaan leveistä teistä poiketen ajolinjojen kohdalle syntyvänä urautumisena. Ajourien välinen harjanteen korkeus on kapeilla teillä osoittautunut selvästi paremmaksi poikkisuuntaisen epätasaisuuden tunnusluvuksi kuin ulkouran syvyys (kuva 14).



Kuva 14. Harjanteen korkeuden määrittämisperiaate [Belt ym., 2000a].

### Paksupäälysteiset tierakenteet

Liikennekuormituksen ja sitä kautta sidotun kerroksen alapinnan vetomuodonmuutosten toistuessa riittävän monta kertaa kerros alkaa vaurioitua väsymällä. Päälysteen väsyminen on asteittain kehittyvä ja ilmenee vaurioitumisen loppuvaiheessa päälysteeseen syntyvinä verkkohalkeamina. Päälysteen paksuutta kasvattamalla ja paksuilla päälysteillä myös päälysteen



jäykkyyttä lisäämällä voidaan sidotun kerroksen väsymistä pienentää tehokkaasti. Päälysteen väsyminen on yleensä kriittinen tekijä paksupäälysteisillä tierakenteilla.

Liikennekuormituksesta päälysteen alapintaan kohdistuvat rasitukset riippuvat päälysteen ominaisuuksien lisäksi oleellisesti ylimmän sitomattoman eli kantavan kerroksen jäykkyydestä. Kantavan kerroksen jäykkyys riippuu materiaaliominaisuuksien lisäksi kerrospaksuudesta ja alla olevista sitomattomista kerroksista ja alusrakenteen laadusta. Päällä olevan sitomattoman kerroksen muodonmuutosmoduuli voi olla ainoastaan rajoitetusti korkeampi kuin alla olevan kerroksen moduuli, johtuen siitä, että sitomaton materiaali ei voi ottaa vastaan vetorasituksia. Tästä syystä myös kantavan kerroksen alla olevien päälysrakennekerrosten yhteispaksuudella on tärkeä merkitys päälysteen kestävyyskannalta alusrakenteen ollessa heikko.

### 3.3 Tierakenteen toiminta ilmastokuormituksessa

Tierakenteeseen kohdistuvia ilmastokuormituksia syntyy lämpötilan ja kosteusolosuhteiden sekä niiden muutosten ja roudan vaikutuksesta.

Lämpötilan ja sen muutosten vaikutus kohdistuu bitumilla sidottuihin rakennekerroksiin. Bitumilla sidottujen eli asfalttikerrosten jäykkyys muuttuu lämpötilan mukaan siten, että korkeissa lämpötiloissa eli kesäolosuhteissa asfaltti toimii pienellä jäykkyydellä ja matalissa lämpötiloissa eli talvella asfalttikerroksella on suuri jäykkyys. Tämä merkitsee tierakenteen toiminnan kannalta, että kuumissa kesäolosuhteissa bitumilla sidottu päälystelaatta jakaa kuormia alempiin kerroksiin merkittävästi huonommin kuin alhaisissa lämpötiloissa talvella. Liikennekuormituksen synnyttämä rasitus tierakenteeseen kasvaa kesäaikana. Sen sijaan talvella, tierakenteen ollessa jäässä, liikennekuormituksen vaikutus tierakenteen vaurioitumiseen on vähäistä.

Vallitsevilla kosteusolosuhteilla on huomattava vaikutus varsinkin kevytpäälysteisillä teillä sitomattomien materiaalien pysyvien muodonmuutosten syntymiseen, mikä näkyy tien pinnalla urautumisena eli poikkisuuntaisena epätasaisuutena. Tierakenteen kosteusolosuhteet pyritään pitämään hallinnassa tien kuivatuksella. Kuivatuksella pyritään siihen, että sade- ja sulamisvedet johdetaan nopeasti pois ennen kuin ne ehtivät imeytyä tierakenteeseen. Tierakenteen suunniteltu kuormituskestävyys edellyttää, että kuivatus toimii kunnolla.

Roudalla on kahdensuuntaisia vaikutuksia tierakenteen toimintaan. Tierakenteen jäätyessä eli routaantuessa sen jäykkyys ja kuormituskestävyys lisääntyy merkittävästi. Toisaalta tien alusrakenteen ollessa routivaa syntyy sen jäätyessä routimista, mikä aiheuttaa routanousua eli rakenteen pinnan kohoamista. Epätasainen routanousu saa aikaan epätasaisuutta ja halkeamia tiehen.

Tien routimista ja routanousujen suuruutta voidaan rajoittaa tien päällysrakenteen paksuudella. Päällysrakenteen paksuus vaikuttaa kahdella tavalla tien routimiseen. Routimisaika tien alusrakenteessa pienenee, kun päällysrakenteen paksuus kasvaa. Lisäksi paksun päällysrakenteen lisääntyvä paino pienentää alusrakenteen routimismahdollisuuksia. Mitä paksumpi on tien päällysrakenne, sitä vähäisempää on tien routiminen.

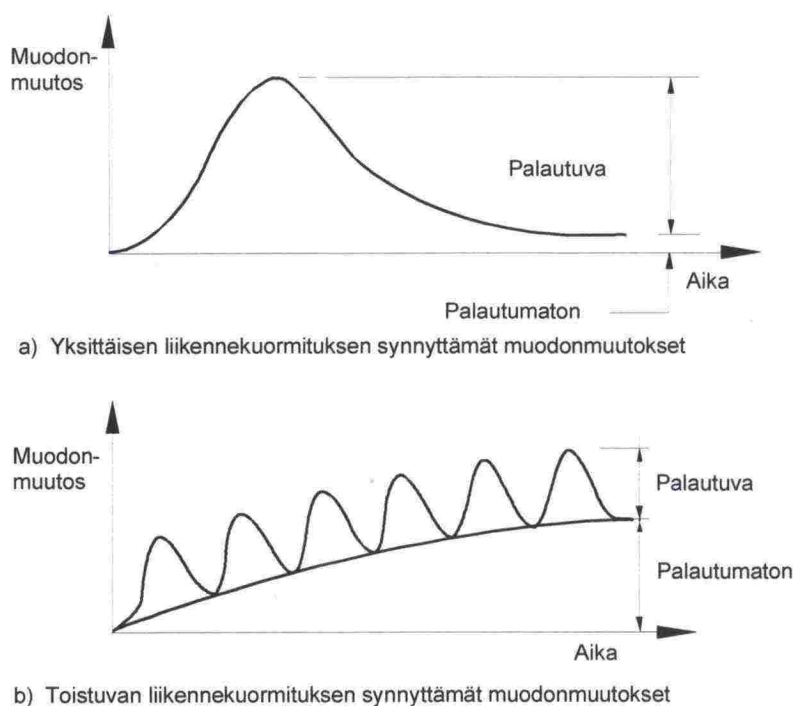
Keväällä roudan ja tien varren lumivallien sulaessa kasvaa tierakenteen vesipitoisuus merkittävästi. Samalla myös routineen alusrakenteen tiiviys on alentunut. Nämä muutokset saavat aikaan sen, että tien kuormituskestävyys on keväällä alhainen. Tästä johtuen liikennekuormituksen aiheuttama vaurioituminen painottuu voimakkaasti kevätolosuhteisiin.

## 4 RAKENNEKERROSTEN OMINAISUUDET JA TOIMINTA

### 4.1 Kuormituskäyttäytymisen perusteet

Tierakenteen laskennalliset kuormituskestävyystarkastelut edellyttävät kriittisten rasitusten määrittämistä. Jotta kriittiset rasitukset voidaan määrittää, täytyy eri kerrosten ja alusrakenteen moduulit sekä Poisson luvut tuntea. Kuormituksen suuntaan nähden kohtisuoran muodonmuutoksen suhdetta kuormituksen suuntaiseen muodonmuutokseen kutsutaan Poisson luvuksi ( $\nu$ ). Poisson luku kuvaa materiaalin kokoonpuristuskäyttäytymistä ja vaihtelee 0 ja 0.5 välillä. Vaikka tienrakennusmateriaalit eivät ole täysin kimmoisia, voidaan soveltaa lineaarista kimmoteoriaa käyttämällä tieolosuhteita vastaavia moduulin arvoja ja Poisson luvulle vakio arvoa (0.35).

Yksittäisen liikennekuormituksen rakennekerrokseen synnyttämästä muodonmuutoksesta suurin osa palautuu kuormituksen poistuttua. Osa muodonmuutoksesta jää kuitenkin pysyväksi (kuva 15). Toistuvien kuormitusten myötä pysyvä muodonmuutos lisääntyy.



Kuva 15. Tienrakennusmateriaalien kuormitus-muodonmuutoskäyttäytyminen [Brown, 1993].

Bitumilla sidotuille kerroksille on ominaista, että moduulit riippuvat voimakkaasti lämpötilasta ja kuormitusajasta eli ajoneuvon nopeudesta. Sitomattomille kerroksille ja alusrakenteelle on puolestaan ominaista, että moduulit riippuvat paljon jännitystilasta.



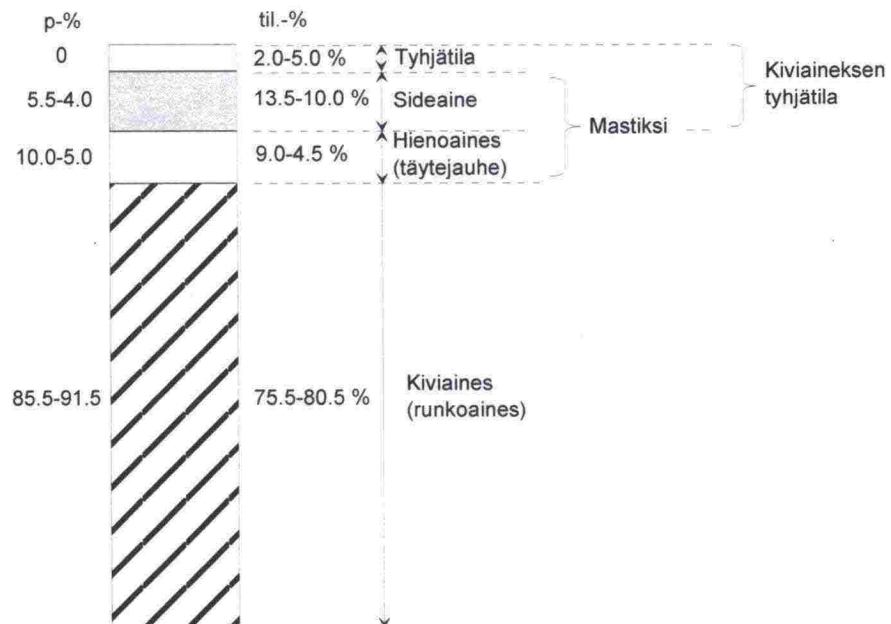
## 4.2 Bitumilla sidotut kerrokset

### 4.2.1 Sideaineet ja kerrosten koostumus

Yleisimpiä bitumisia sideaineita ovat (tislatus) bitumit, polymeerimodifioidut eli kumibitumit sekä bitumiemulsiot. Bitumiemulsio sisältää bitumia, vettä ja emulgaattoria. Veden poistumisen jälkeen sideaineen ominaisuudet vastaavat alkuperäisen bitumin ominaisuuksia eli valmiissa päällysteessä sideaineena toimii vain emulsion bituminen osa [Blomberg, 1990].

Bitumit luokitellaan perinteisesti tunkeuman eli jäykkyyden perusteella eri kovuusluokkiin. Vilkasliikenteisillä teillä käytetään yleensä kovempia sideaineita kuin vähäliikenteisillä teillä paremman kuormituskestävyyden takia. Pehmeät bitumit puolestaan ovat joustavia, mikä on edullista vähäliikenteisillä teillä ja Pohjois-Suomessa pakkaskestävyyden takia. Kulutuskerroksen asfalttobetoneissa käytetään suurempia bitumipitoisuuksia kuin bitumilla sidotuissa kantavissa kerroksissa tai pehmeissä asfalttobetoneissa.

Bitumilla sidotut kerrokset koostuvat kiviaineksesta (runkoaines), sideaineesta ja hienoaineksesta sekä tyhjätilasta (kuva 16). Bitumi yhdessä siihen laastimaisesti sitoutuneen hienoaineksen kanssa muodostaa ns. mastiksin, joka täyttää rakeiden välejä ja liimaa ne toisiinsa. Päällysteen hienoaines on peräisin kiviaineslajitteista ja täytejauheesta. Vaikka asfaltin komponenttien osuuksia käsitellään yleensä painon mukaan, tilavuusosuudet kuvaavat paremmin bitumilla sidotun kerroksen koostumusta toiminnallisten ominaisuuksien kannalta.



Kuva 16. Asfalttibetonikerroksen komponentit ja koostumus [Ehrola, 1996].

#### 4.2.2 Bitumilla sidottujen kerrosten kuormituskäyttäytyminen

Koko tierakenteen toiminnan kannalta keskeisiä sidottujen kerrosten ominaisuuksia ovat:

- palautuva eli kimmainen muodonmuutuskäyttäytyminen (moduuli ja Poissonin luku)
- väsymiskestävyys
- deformaatiokestävyys
- kulumiskestävyys
- säänkestävyys
- halkeilutaipumus

Väsymiskestävyys kuvaa sidotun kerroksen kykyä kestää toistuvia raskaiden ajoneuvojen aiheuttamia liikennekuormituksia vaurioitumatta. Deformaatiokestävyys puolestaan tarkoittaa kerroksen kykyä vastustaa pysyvien muodonmuutosten syntymistä itse kerrokseen raskaiden ajoneuvojen aiheuttamien rasitusten seurauksena. Kulumiskestävyydellä ymmärretään, kuinka hyvin kerros kestää nastarenkaiden aiheuttamaa kulutusta.

Säänkestävyydellä ymmärretään, kuinka hyvin kerros kestää sideaineen vanhenemista sekä veden ja jäätyksen vaikutuksia. Halkeilutaipumus puolestaan kuvaa sidotun kerroksen kykyä kestää lämpötilamuutoksia (termisiä jännityksiä) vaurioitumatta.

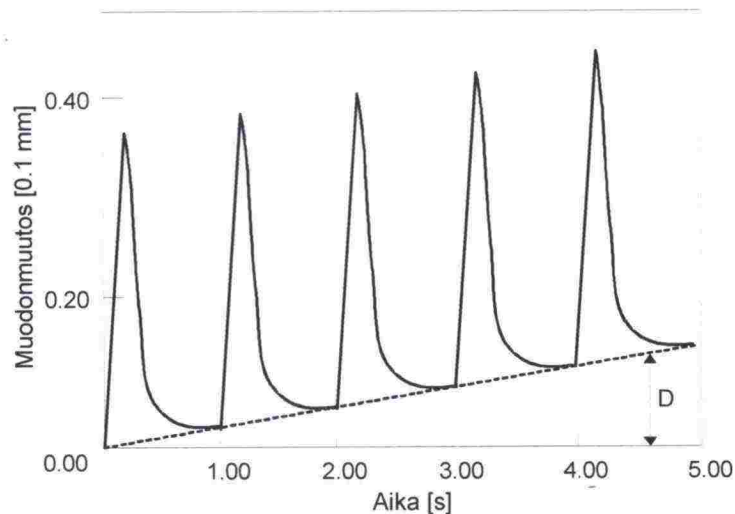
Se, mitkä sidotun kerroksen ominaisuudet ovat kussakin tapauksessa merkityksellisiä, riippuu mm. liikenteestä, kerroksen sijainnista tierakenteessa ja sideaineen laadusta. Esim. kulumiskestävyys on tärkeää ainoastaan kulumuskerroksen ja väsymiskestävyys alimman sidotun kerroksen osalta vilkasliikenteisillä teillä.

Kulumiskestävyuden lisäksi bitumilla sidottujen kerrosten osalta keskeisiä ominaisuuksia ovat palautuva muodonmuutuskäyttäytyminen (jäykkyys) ja osittain halkeilutaipumus liikennemäärästä riippumatta. Raskaasti liikennöidyillä teillä myös väsymis- ja deformaatiokestävyys ovat tärkeitä ominaisuuksia. Suomen olosuhteissa sideaineen koveneminen vanhetessaan ei aiheuta yleensä ongelmia johtuen siitä, että kulutuskerrokset ovat yleensä tiiviitä (pieni tyhjätila).

Bitumilla sidottujen kerrosten massakomponenttien keskinäiset suhteet sekä kiviaineksen ja bitumin ominaisuudet määräävät kerroksen käyttäytymisen kuormituksessa. Bitumin viskoelastiset ominaisuudet siirtyvät sideaineen mukana myös bitumilla sidottuun kerrokseen. Viskoelastisuus tarkoittaa sitä, että materiaalin mekaaniset ominaisuudet riippuvat lämpötilasta ja kuormitusajasta. Matalissa lämpötiloissa ja lyhyillä kuormitusajoilla asfaltti käyttäytyy elastisen materiaalin tavoin. Korkeissa lämpötiloissa tai pitkillä kuormitusajoilla asfaltti on luonteeltaan viskoosinen neste. Tierakenteissa asfaltti omaa sekä elastisia että viskoosisia ominaisuuksia. Bitumilla sidotun materi-

aalin moduulista käytetään yleisesti termiä jäykkyyshmoduuli, millä korostetaan moduulin riippuvuutta lämpötilasta ja kuormitusajasta [Ehrola, 1996].

Viskoelastisesta luonteesta johtuen bitumilla sidottuun kerrokseen syntyy joko-  
kaisella kuormituksella tietty pysyvä muodonmuutos (kuva 17). Toisaalta  
samanlaisella toistuvalla kuormituksella palautuva muodonmuutos ja samal-  
la myös pysyvän muodonmuutoksen kasvu vakioituvat jo muutaman kuormi-  
tuspulssin jälkeen. Käytännössä pysyvä muodonmuutos on yhtä kuormitusta  
kohti pieni.



Kuva 17. Bitumilla sidotun kerroksen muodonmuutokset toistuvassa kuormituksessa [Blomberg, 1990].

Bitumilla sidotun kerroksen jäykkyyshmoduuli riippuu myös sideaineen laadusta ja asfaltin koostumuksesta (taulukko 5). Sideaineen ollessa pehmeää (B160/220) jäykkyyshmoduuli on ainoastaan runsas kolmannes kovaa (B50/70) bitumia sisältävän asfaltin jäykkyyshmoduuliin verrattuna. Bitumilla sidotun kerroksen tyhjätilan kasvu alentaa kerroksen jäykkyyttä. Ohutpäällysteisillä ( $\leq 80$  mm) teillä päällyste toimii pian valmistumisen jälkeen osittain halkeilleessa tilassa, mikä alentaa myös päällysteen jäykkyyttä.

Taulukko 5. Asfalttipäällysteiden jäykkyyshmoduuleja lämpötilan ollessa  $+20^{\circ}\text{C}$  ja kuormitusajan 0.013 s (80 km/h) [Liimatta ym., 1999].

Asfaltin laatu	Sideaineen laatu	Sideaineen määrä %	Tyhjätila %	Jäykkyyshmoduuli MPa
AB	B50/70	5.0	2.0	7000
AB	B70/100	5.0	2.0	6000
AB	B100/150	5.0	2.0	4000
AB	B160/220	5.0	2.0	2500
AB	B100/150	5.0	4.0	3500
ABK	B100/150	4.3	4.0	3500
ABK	B150/150	4.3	6.0	2500

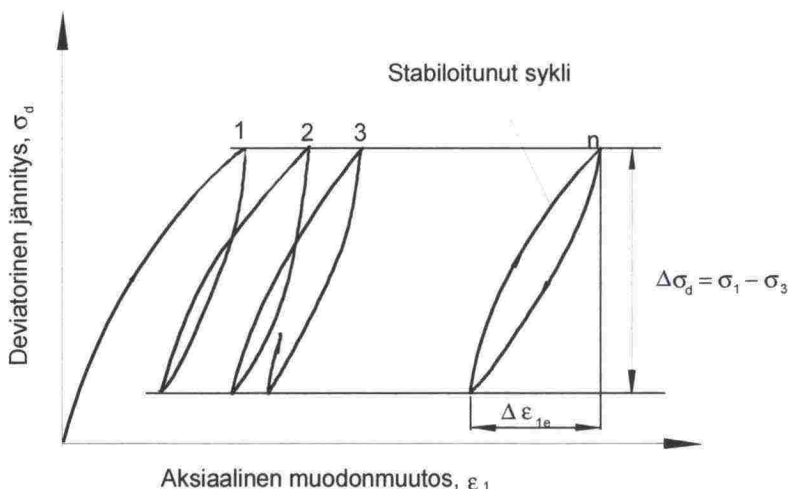


Bitumilla sidottujen kerrosten ominaisuuksia tarkastellaan lisää kohdassa 5.2.

### 4.3 Sitomattomat kerrokset ja alusrakenne

#### 4.3.1 Palautuva muodonmuutoskäyttäytyminen

Tierakenteen toiminnan kannalta keskeisiä sitomattomien materiaalien ominaisuuksia ovat palautuva ja palautumaton muodonmuutoskäyttäytyminen. Tierakenteessa toistuvat liikennekuormitukset synnyttävät sitomattomiin kerroksiin ja alusrakenteeseen sekä pysyviä että palautuvia muodonmuutoksia. Kuormitusten lisääntyessä palautumattomien muodonmuutosten osuus pienenee ja muodonmuutos on tietyn kuormitusmäärän jälkeen lähes kokonaan palautuva eli materiaali käyttäytyy lähes kimmoisesti (kuva 18).

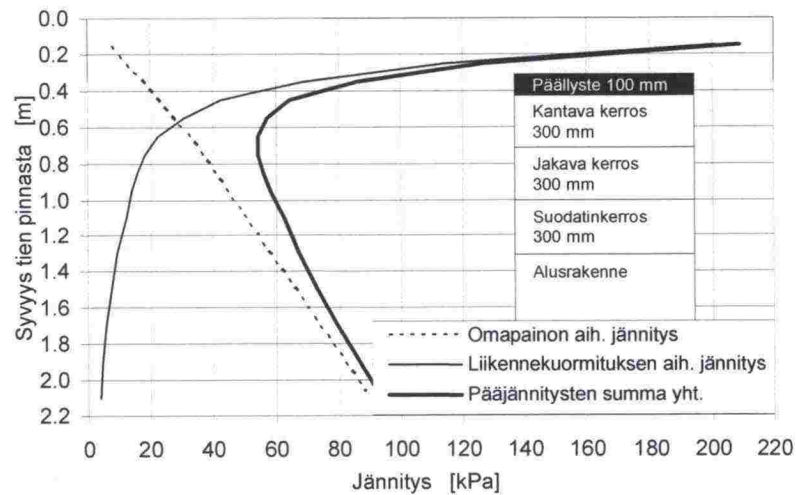


Kuva 18. Sitomattoman materiaalin kuormitus-muodonmuutoskäyttäytyminen.

Sitomattomien materiaalien kimmomoduuli määritetään laboratoriokokeissa toistuvien kuormitusten jälkeen stabiloituneesta kuormituskäyttäytymisestä. Näin määritetyn moduulin otaksutaan vastaavan tilannetta tierakenteessa. Koska sitomattomien materiaalien muodonmuutoskäyttäytymiseen vaikuttavat monet sellaiset tekijät, jotka tavallisesti eivät liity materiaalin kimmoisiin ominaisuuksiin, muodonmuutosmoduulista käytetään usein termiä resilient-moduuli.

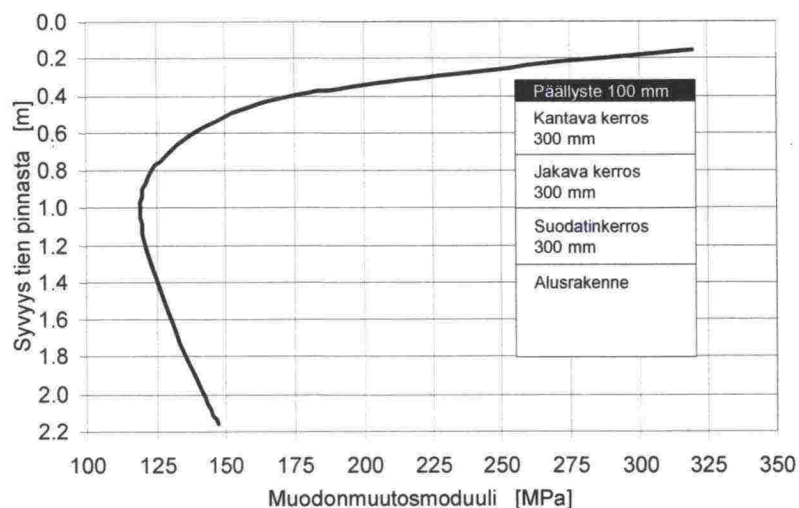
Sitomattomien materiaalien moduuli riippuu voimakkaasti vallitsevasta jännitystilasta. Karkearakeisilla kitkamaalajeilla moduulin jännitystilariippuvuutta kuvataan pääjännitysten summan avulla. Tierakenteessa pääjännitysten summa on suurimmillaan ylimmän sitomattoman kerroksen pinnassa (kuva 19). Syvemmälle mentäessä pääjännitysten summa pienenee tiettyyn rajaan asti, minkä alapuolella se puolestaan kasvaa. Pääjännitysten summaan vaikuttavat sekä liikennekuormitus että päällä olevien kerrosten paino. Liiken-

nekuormituksen merkitys pääjännitysten summaan vähenee voimakkaasti syvyyden kasvaessa. Sen sijaan rakenteen painon vaikutus kasvaa lähes lineaarisesti syvyyden kasvaessa.



Kuva 19. Pääjännitysten summan muodostuminen tavanomaisessa tierakenteessa.

Tierakenteessa kitkamaalajien muodonmuutosmoduuli on suurimmillaan rakenteen yläosassa johtuen liikennekuormituksesta (kuva 20). Muodonmuutosmoduuli on usein pienimmillään suodatinkerroksessa johtuen siitä, että pääjännitysten summa on tällöin pienimmillään. Mentäessä syvemmälle rakenteeseen moduuli kasvaa yleensä rakenteen oman painon merkityksen kasvaessa.



Kuva 20. Sitomattomien materiaalien muodonmuutosmoduuli tavanomaisessa tierakenteessa.

Sitomattomien kerrosten moduuli ei muutu tierakenteessa "hyppäyksittäin" rakennekerrosten rajapinnoilla, vaikka materiaalit ja niiden ominaisuudet muuttuvatkin. Tämä johtuu siitä, että tierakenne toimii yhtenäisenä kokonaisuutena [Lämsä, 2000].

Päällysteen paksuudella on huomattava vaikutus ylimmän sitomattoman päällysrakennekerroksen jännitystilaan ja sitä kautta moduuliin (taulukko 6). Päällysteen paksuuden lisääntyminen 40 mm:stä 120 mm:iin pienentää kantavan kerroksen moduulia 40 %. Vastaava muutos päällysteen paksuudessa pienentää jakavan kerroksen moduulia runsaat 20 % ja suodatinkerroksen moduulia noin 10 % eli päällysteen paksuuden merkitys moduuliin vähenee alempana tierakenteessa. Myös päällysteen jäykkyys vaikuttaa moduulin arvoon, joskin selvästi vähemmän kuin päällysteen paksuus.

*Taulukko 6. Tyypillisiä sitomattomien päällysrakennekerrosten muodonmuutosmoduuleja kerrosten keskellä yksittäispyöräkuormituksella [Belt, 1997].*

Kerros	Kerros- paksuus mm	Päällyste		Muodonmuutos- moduuli MPa
		Paksuus mm	Moduuli MPa	
Kantava	200	40	2000	460
		40	5000	420
		80	5000	320
		120	5000	250
Jakava	200	40	2000	230
		40	5000	220
		80	5000	190
		120	5000	170
Suodatin	360	40	2000	100
		40	5000	100
		80	5000	100
		120	5000	90

Alusrakenteen ollessa hienorakeista koheesiomaata kuten savea muodonmuutosmoduuli pienenee (deviatorisen) jännityksen kasvaessa. Materiaaliominaisuuksien ja olosuhteiden lisäksi koheesiomaalajin moduuli riippuu käytännössä liikennekuormituksen suuruudesta sekä päällysrakenteen ja sidottujen kerrosten paksuudesta. Mitä suurempi on pyöräkuormitus tai ohuempi päällysrakenne tai sidottujen kerrosten paksuus, sitä pienemmällä moduulin arvolla hienorakeinen alusrakennemateriaali toimii.

Alusrakenteen muodonmuutosmoduulit riippuvat jännitystilan eli käytännössä päällysrakenteen paksuuden lisäksi materiaalin laadusta ja kosteusolosuhteista (taulukko 7). Routivilla hienorakeisilla materiaaleilla moduulit ovat keväällä alhaisempia kuin kesällä tai syksyllä. Samoin on tilanne silloin, kun pohjavesi on lähellä alusrakenteen pintaa. Suluissa olevat arvot kuvaavat tilannetta, missä pohjaveden etäisyys on yli metrin syvyydellä alusrakenteen pinnasta.



Taulukko 7. Pudotuspainolaitteella mitatuista taipumista laskettuja alusrakenteen muodonmuutosmoduuleja [Djurf ym., 1996].

Maalaji	Muodonmuutosmoduuli, [MPa]		
	Kevät	Kesä ja syksy	Penkereessä h > 1m
Sa (ei pehmeä)	35 (50)	45 (50)	50
siSa, Si, saSi	20 (25)	25 (35)	50
siHk, saHk	35 (50)	45 (50)	60
Hk, srHK *	50 (50)	50 (50)	50
hkSr, Sr *	75 (75)	75 (75)	75
SiMr, saSiMr	45 (60)	60 (60)	70
siHkMr, hkSiMr	70 (80)	80 (80)	80
srHkMr *	125 (125)	125 (125)	125
Lo			150

\* routimaton

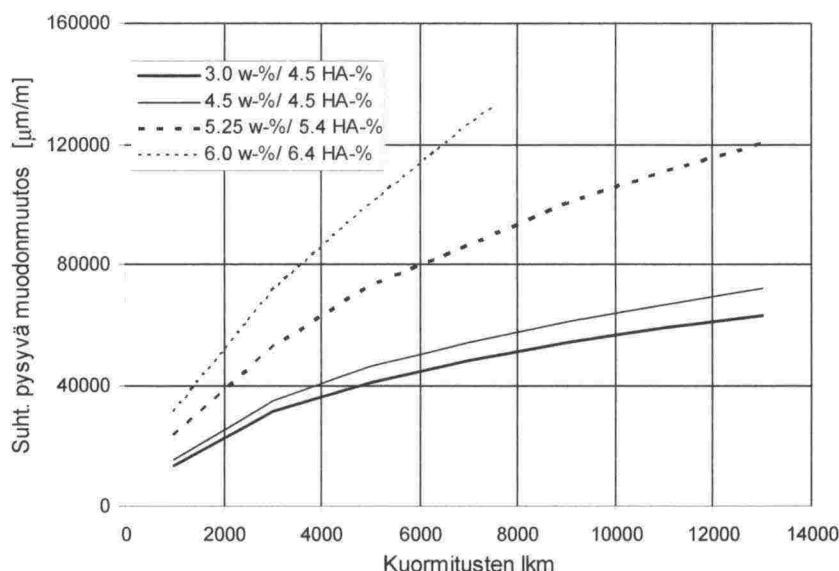
#### 4.3.2 Pysyvä muodonmuutoskäyttäytyminen

Pysyviä muodonmuutoksia voi syntyä kaikkiin päällysrakennekerroksiin ja alusrakenteeseen. Kaikki pysyvät muodonmuutokset heijastuvat tien pintaan joko poikki- tai pituussuuntaisena epätasaisuutena.

Sitomattoman materiaalin pysyviin muodonmuutoksiin vaikuttavat mm. [Le-karp, 1997]:

- jännitystila (kuormitusten suuruus ja rakenne)
- kuormitusten määrä
- kosteusolosuhteet
- jännityshistoria (aiemmat kuormitukset)
- materiaalin tiiviys
- materiaalin rakeisuus ja kiviaines

Laboratoriomittakaavaisella tierakenteiden tutkimuslaitteella (TKT-laite) tehtyjen simulointikokeiden perusteella päällysteen ollessa ohut sitomattoman kantavan kerroksen pysyvät muodonmuutokset ovat merkittäviä ja kasvavat säännöllisesti kasvunopeuden hidastuessa kuormitusten määrän lisääntyessä (kuva 21). TKT-testien perusteella sitomattoman kantavan kerroksen pysyvät muodonmuutokset ovat mallinnettavissa kimmoisten muodonmuutosten, hienoaainespitoisuuden ja kosteuden avulla.



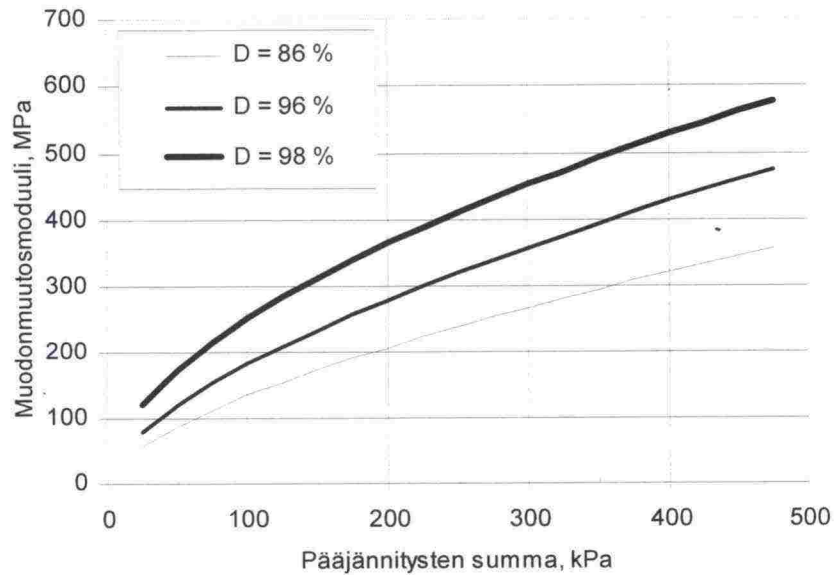
Kuva 21. Sitomattoman kantavan kerroksen pysyvät muodonmuutokset TKT-testeissä eri kosteus- ja hienoainespitoisuuksilla [Belt ym., 2000b].

Alusrakenteen pysyvien muodonmuutosten ennustamista on useimmiten lähestytty tierakenteen vaurioitumista kuvaavien kokemuseräisten mallien avulla. Käytännössä alusrakenteen pysyvät muodonmuutokset riippuvat materiaalin laadun ja ympäristöolosuhteiden lisäksi pääasiassa päällysrakenteen paksuudesta ja jäykkyydestä eli tekijöistä, jotka vaikuttavat eniten liikennekuormituksen alusrakenteeseen aiheuttamaan rasitustilaan. Suomen tiestöllä liikennekuormituksen aiheuttamat alusrakenteen pysyvät muodonmuutokset eivät yleensä ole kovinkaan merkittäviä urautumisen kannalta johtuen suhteellisen paksuista päällysrakenteista.

#### 4.3.3 Materiaaliominaisuuksien ja olosuhteiden merkitys muodonmuutoksiin

Sitomattomien materiaalien muodonmuutosmoduulit riippuvat jännitystilan lisäksi raekokominaisuuksista, tiiviyydestä ja vallitsevasta kosteustilasta. Materiaaleilla, joiden rakeisuuskäyrä on tasaisesti kaartuva, maksimi raekoko suuri ja jotka sisältävät vähän savilajitetta (<0.002 mm), on pääsääntöisesti hyvät palautuvat ja pysyvät muodonmuutosominaisuudet.

Tiiviyyden lisääntyminen kasvattaa sitomattomien materiaalien jäykkyyttä (kuva 22). Tiiviydellä on merkittävä vaikutus myös pysyvien muodonmuutosten syntymiseen. Yleisesti ottaen tiiviillä materiaalilla pysyvien muodonmuutosten määrä on aina vähäisempi kuin löyhässä tilassa olevalla [Ehrola, 1996].



Kuva 22. Sitomattoman kantavan kerroksen materiaalin tiiviysasteen ( $D$ ) vaikutus muodonmuutosmoduuliin [Kolisaja, 1996].

Rakeiden fysikaaliset ominaisuudet kuten rakeiden muoto, pinnan karkeus, lujuus ja pysyvyys ovat tekijöitä, joilla on merkitystä ennen kaikkea karkearakeisten materiaalien pysyvien muodonmuutosten kehittymiseen. Kuutiomaisen muodon omaava kiviaines pakkaantuu tiiviimmäksi kuin puikkoinen tai liuskeinen kiviaines. Murtopintainen kiviaines vastustaa pysyviä muodonmuutoksia tehokkaammin kuin sileäpintainen kiviaines.

Kiviaineen lujuudella on myös merkitystä ennen kaikkea pysyviin muodonmuutoksiin. Kiviaineen rakeiden murenemisen ja rikkoutumisen seurauksena materiaalin hienoainespitoisuus lisääntyy. Kiviaineen lujuuden merkitys korostuu tierakenteen ylimmässä sitomattomassa kerroksessa, missä liikennekuormituksen aiheuttama rasitus on suuri. Kiviaineen rakeiden kyky vastustaa mekaanista hienontumista sekä kemiallista ja fysikaalista rapautumista riippuu kiviaineen mineralogiasta.

Kosteustilalla on selvä vaikutus sitomattomien materiaalien palautuvaan muodonmuutoskäyttäytymiseen. Pääsääntöisesti kosteuspitoisuuden lisääntyminen pienentää maa-ainesten jäykkyyttä. Veden läsnäolo lisää periaatteessa aina sitomattomien materiaalien pysyviä muodonmuutoksia. Karkearakeisilla materiaaleilla ei alhaisilla kyllästysasteen arvoilla ero kuivaan materiaaliin ole kovin suuri, mutta kyllästysasteen ylittäessä kriittisen arvon, sorilla ja murskeilla noin 80-85 %, alttius palautumattomien muodonmuutosten lisääntymiselle kasvaa hyvin voimakkaasti.

Rakeisuudeltaan toisiaan vastaavien materiaalien kyky imeä itseensä vettä voi poiketa myös huomattavasti toisistaan riippuen materiaalien mineralogiasta. Jos varsinkin ylimmän sitomattoman kerroksen materiaali imee herkäs-



ti itseensä vettä, pysyvien muodonmuutosten syntyminen on todennäköisesti nopeaa [Saarenketo ym., 2001].

Materiaalin käyttökelpoisuus riippuu myös siitä, mihin kerrokseen materiaalia käytetään. Koska liikennekuormitus aiheuttaa suurimmat rasitukset ylimpään sitomattomaan eli kantavaan kerrokseen, suurimmat materiaalivaatimukset kohdistuvat juuri kantavaan kerrokseen. Sitomattoman kantavan kerroksen materiaalin heikkous johtuu yleisimmin yhdestä tai useammasta seuraavista tekijöistä:

- suuri hienoainespitoisuus ( $< \# 0.063 \text{ mm}$ )
- puutteellinen lujuus (hienoaineksen määrän lisääntyminen)
- imee itseensä paljon vettä (mineralogia)

Edellä esitettyjen tekijöiden merkitys konkretisoituu kosteuden kautta, koska materiaalin kyky sitoa itseensä vettä lisääntyy hienoaineksen määrän kasvaessa. Kosteuden lisääntyminen heikentää ennen kaikkea materiaalin kykyä vastustaa pysyviä muodonmuutoksia. Sitomalla heikko materiaali esim. bitumisella sideaineella sen ominaisuudet yleensä paranevat ratkaisevasti.

## 5 PÄÄLLYSTETYN TIESTÖN VAURIOT JA KUNTO

### 5.1 Vauriotyypit ja kunnon arviointi

Tien pinnalla näkyvät vauriot voidaan luokitella taulukon 8 mukaisesti.

*Taulukko 8. Päällistetyn tiestön vauriotyypit.*

Päättyppi	Alatyyppi
Halkeama	Poikkihalkeama
	Pituushalkeama
	Vinohalkeama
	Saumahalkeama
	Verkkohalkeama
Epätasaisuus	Pituussuuntainen epätasaisuus
	Poikkisuuntainen epätasaisuus
Hajoamisvaurio	Purkauma
	Reikä

Halkeamien syitä ovat routiminen (kuva 23), painuminen ja lämpötilamuutoksiin liittyvät jännitykset sekä raskaan liikenteen aiheuttamat rasitukset.

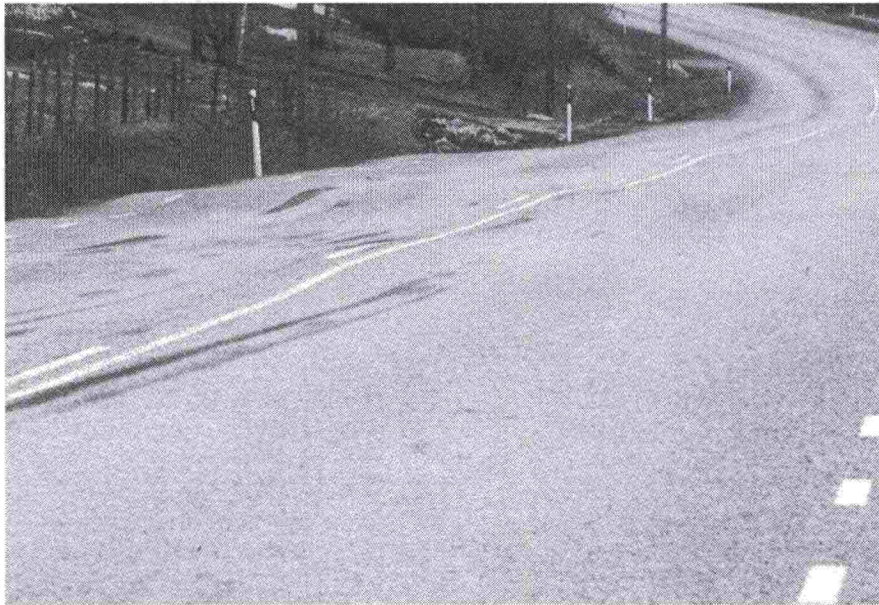


*Kuva 23. Routimisen aiheuttamaa pituushalkeilua.*

Tien pituussuuntainen epätasaisuus ilmenee erilaisina heittoina ja painaumina (kuva 24). Tien pituussuuntaisten epätasaisuuksien synty ja lisää-



tyminen ovat yhteydessä liikennekuormitukseen, tierakenteen omaan painoon ja epätasaisiin routanousuihin sekä tierakenteen laatuun ja toimintaan. Varsinkin alemmalla tieverkolla routiminen on yleisin syy pituussuuntaiseen epätasaisuuteen.



Kuva 24. Routimisen aiheuttamaa pituussuuntaista epätasaisuutta.

Tien poikkisuuntainen epätasaisuus ilmenee leveillä teillä urautumisena. Kapeilla teillä ajourien välinen harjanteen korkeus kuvastaa hyvin poikkisuuntaista epätasaisuutta. Poikkisuuntaisen epätasaisuuden syyt ovat päällysteen kulumisen sekä päällysteen, sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen pysyvät muodonmuutokset. Poikkisuuntainen epätasaisuus johtuu vilkasliikenteisillä teillä pääasiassa kulumisesta ja vähäliikenteisillä teillä pysyvistä muodonmuutoksista.

Päällysteen hajoamisvaurioiden eli purkaumien ja reikien perussy on sideaineen ja kiviainesrakeiden välinen heikko sidos, mikä puolestaan johtuu päällystemassan ominaisuuksista.

Samat tekijät saattavat vaikuttaa erityyppisten vaurioiden muodostumiseen. Tietyn tyyppisen vaurion syntyminen yleensä myös nopeuttaa toisen tyyppisen vaurion muodostumista. Pahoin vaurioituneilla tieosuuksilla ilmenee yhtä aikaa useita vauriotyyppejä, jolloin on vaikeaa tai lähes mahdotonta esittää yleispätevää tien vaurioitumisprosessia.

Päällysteen vaurioitumista kuvataan myös ns. vauriosummalla (VS), mikä tarkoittaa rikkinäisen päällysteen pinta-alaa 100 m:n jaksolla. Vauriosummassa otetaan huomioon erilaiset päällystehalkeamat, reiät, purkaumat ja reunapainumat. Vaurioille on määritetty painokertoimet, joiden avulla erilaiset vauriot voidaan laskea yhteen.



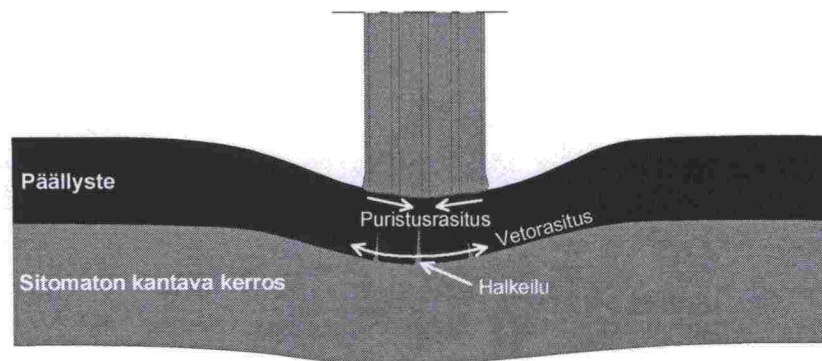
Päällystetyn tiestön kuntotilaa on tarkasteltu kuntotietorekisterin (KURRE) vuosien 1994, 1997 ja 2000 päällystevaurioinventointi (PVI) ja palvelutasomittaus (PTM) -tietojen perusteella koskien verkkohalkeamia, leveitä ja muita halkeamia, vauriosummaa sekä poikki- ja pituussuuntaista epätasaisuutta. Tarkastelu rajattiin käsittämään vain yksiajorataisen päällystetyn tiestön [Lämsä, 2001].

Aineistoa on luokiteltu viiden eri päällystelajin mukaan; AB1, AB2, PAB-B, PAB-v/o ja SOP. Päällystetyypillä AB1 tarkoitetaan yksikerroksista AB-päällystettä. Päällystetyyppi AB2 puolestaan sisältää paksut AB-päällysteet, missä tie on voitu uudelleenpäällystää tai rakenne on kantavan kerroksen yläosaltaan bitumilla sidottu. Päällystetyyppi PAB-v/o sisältää myös vanhat öljysorapäällysteet.

## 5.2 Vaurioituminen ja vaurioiden määrät

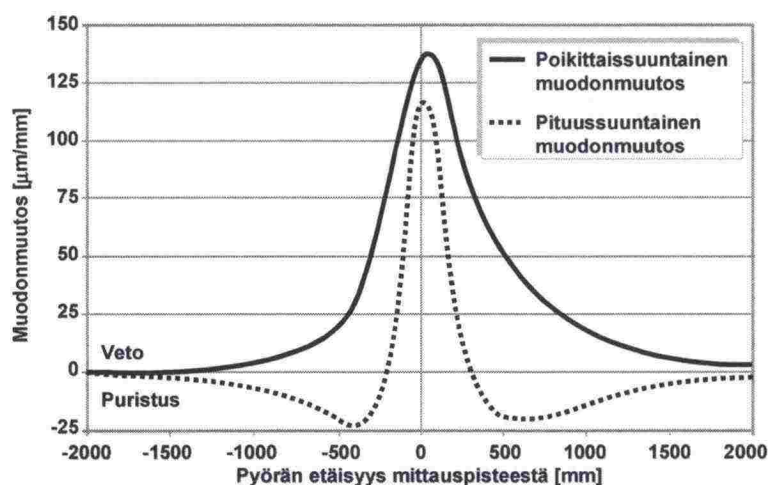
### 5.2.1 Verkkohalkeamat

Jokaisella ylityskerralla tietä kuormittava ajoneuvon rengas saa aikaan tierakenteen taipumisen, minkä suuruus on asfalttipäällysteisellä tierakenteella yleensä alle yhden millimetrin. Rakenteen taipuminen synnyttää sidottujen kerrosten yläpintaan puristusrasituksen ja alapintaan vetorasituksen eli vetojännityksen ja siitä johtuvan vetomuodonmuutoksen (kuva 25). Vetomuodonmuutosten toistuessa riittävän monta kertaa sidottu kerros alkaa vaurioitua. Tätä vaurioitumisprosessia kutsutaan sidotun kerroksen eli päällysteen väsymiseksi [Ehrola, 1996].



Kuva 25. Liikennekuormituksen aiheuttamat asfalttipäällysteen rasitukset ja väsymisvauriot.

Päällysteen alapinnan vetomuodonmuutoksia syntyy pyöräkuormituksen alla sekä tien poikki- että pituussuuntaan (kuva 26). Poikkisuuntainen vetomuodonmuutos on yleensä suurempi kuin pituussuuntainen vetomuodonmuutos johtuen päällysteen viskoosisesta ominaisuudesta eli muodonmuutoksen suuruus riippuu kuormitusajasta. Poikkisuunnassa rasitus on vetoa pitemmän aikaa kuin pituussuunnassa.

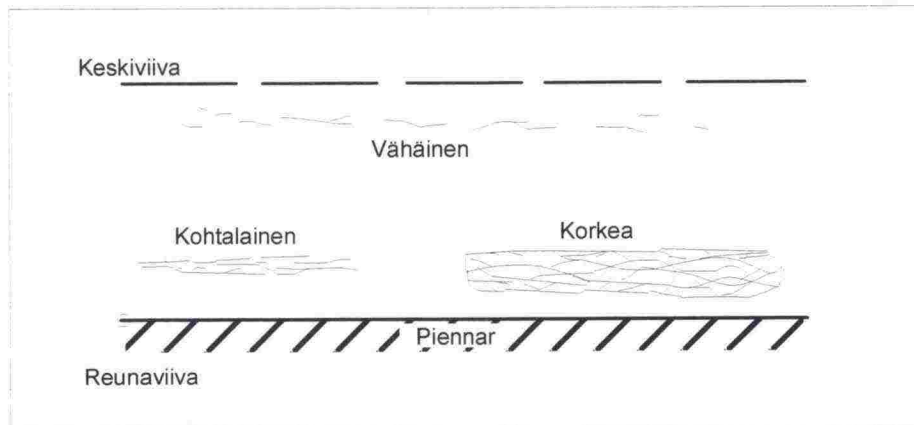


Kuva 26. Pyöräkuormituksen aiheuttamat päällysteen alapinnan pituus- ja poikkisuuntaiset muodonmuutokset [Nilsson, 2001].

Myös päällysteen väsyminen johtuu siitä, että bitumilla ja sitä kautta päällysteellä on sekä kimmoisia että viskoosisia ominaisuuksia. Jos päällyste olisi täysin kimmainen, väsymistä ei esiintyisi. Käytännössä väsyminen tarkoittaa sitä, että bitumin murtolujuus ja -venymä pienenevät kuormituskertojen lisääntyessä. Väsymisvaurioiden perussyyä on kokonaisuutena liian suuri liikennekuormitus eli rakenteellinen kestoikä on ylitetty.

Alkuvaiheessa väsyminen ilmenee sidotun kerroksen alapintaan syntyvinä pituussuuntaisina hiushalkeamina ajourissa. Liikennekuormitusten jatkuessa hiushalkeamat laajenevat ja muodostavat hiushalkeamaverkkoa. Samalla päällysteen jäykkyys pienenee ja pyöräkuorman synnyttämät palautuvat vetomuodonmuutokset kasvavat. Hiushalkeamien laajeneminen lisääntyy ja ne yhtyvät makrohalkeamiksi edeten samalla tien pintaa kohti. Tällöin päällysteeseen alkaa muodostua tien pinnalla näkyviä vaurioita [Ehrola, 1996].

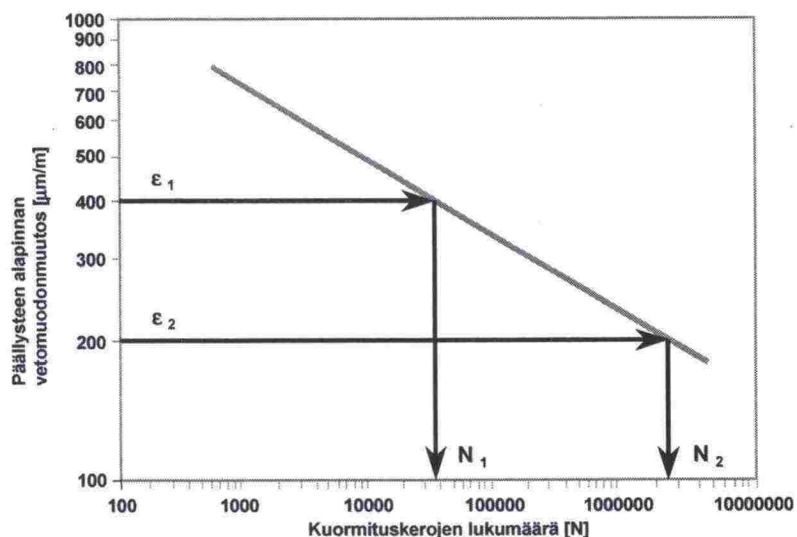
Tien pinnalla näkyvät väsymisvauriot alkavat pääosin pituussuuntaisina halkeamina (kuva 27) ajourien keskellä, missä liikennekuormituksen päällysteeseen kohdistama rasitus on suurinta ja pyöräkuormitusten aiheuttamat päällysteen alapinnan poikkisuuntaiset vetomuodonmuutokset ovat suurempia kuin pituussuuntaiset vetomuodonmuutokset (kuva 26). Vaurioitumisen edetessä halkeamat lisääntyvät ja päällysteeseen syntyy monikulmiomaisia repeämiä eli verkkohalkeilua. Vaurioitumista nopeuttaa se, että pituushalkeama muodostaa tiehen epäjatkuvuuskohdan, missä päällyste ei enää toimi laattana eikä jaa kuormituksia tasaisesti alempiin kerroksiin.



Kuva 27. Päällysteen väsymisvaurioitumisen eteneminen ja vakavuuden asteet.

Liikennekuormituksen aiheuttaman väsymisprosessin seurauksena päällysteen jäykkyys pienenee asteittain. Päällysteen jäykkyys saattaa olla enää vain puolet vastaavan uuden päällysteen jäykkyydestä ennen kuin verkko- halkeilua voidaan havaita tien pinnalla. Esimerkiksi määritettäessä väsymis- kestävyyttä laboratoriokokeilla kuormitusten määrää, millä päällysteen jäyk- kyysmoduuli on laskenut puoleen alkuperäisestä, pidetään väsymiskestä- vyytenä.

Päällysteen väsymistä arvioidaan ns. väsymissuoralla, mikä ilmaisee, kuinka monta kuormitusta päällyste kestää eri muodonmuutostasoilla ennen kuin siihen ilmaantuu väsymisvaurioita (kuva 28). Mitä suuremmat vetomuodon- muutokset sitä vähemmän päällyste kestää kuormituksia vaurioitumatta. Tä- tä yhteyttä hyödynnetään myös päällysteen väsymiskestävyuden mitoitus- sessa.



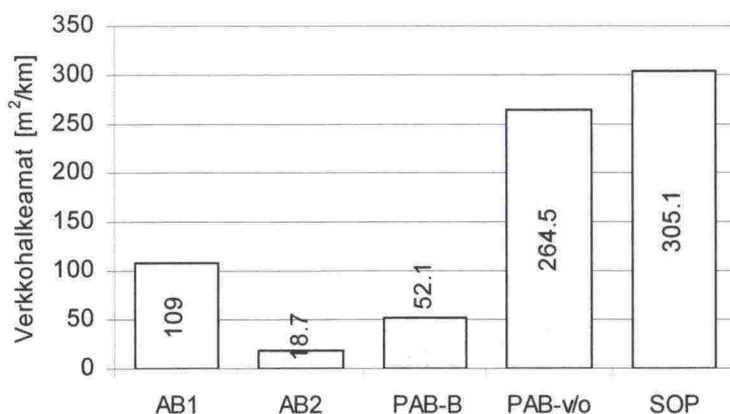
Kuva 28. Väsymissuoramallin periaate.



Päällysteen alapinnan vetomuodonmuutoksia voidaan parhaiten pienentää käyttämällä päällysteen alla olevassa kerroksessa hyvää materiaalia (korkea moduuli) sekä kasvattamalla päällysteen paksuutta ja jäykkyyttä.

Ohutpäällysteisillä ( $\leq 80$  mm) tierakenteilla verkkohalkeamien muodostuminen poikkeaa edellä esitetystä paksujen päällysteiden väsymisvaurioitumis-mekanismista. Ohutpäällysteisillä tierakenteilla sitomattomien kerrosten pysyvät muodonmuutokset (urautuminen) muodostuvat suuriksi. Päällysteen mukautuessa pysyviin muodonmuutoksiin siihen syntyvät poikkisuuntaiset vetomuodonmuutokset ajourissa voivat ylittää päällysteen siirtymiensietokyvyn. Tällöin päällyste voi ikään kuin revetä synnyttäen pituushalkeamaa ajouran keskelle. Tämän seurauksena liikennekuormituksen aiheuttamat rasitukset kasvavat aiheuttaen päällysteen lisävaurioitumista kuten verkkohalkeamia.

Kuntotietorekisterin perusteella verkkohalkeamien suhteellinen määrä oli ohuilla yksikerroksisilla AB-teillä (AB1) huomattavasti suurempi kuin paksupäällysteisillä useampi kerroksisilla AB-teillä (AB2). Kevytpäällysteisillä PAB-v/o ja SOP-teillä verkkohalkeamien määrä oli puolestaan vielä selvästi suurempi kuin muilla päällystetyypeillä (kuva 29).



Kuva 29. Verkkohalkeamat kilometriä kohti vuonna 2000 [Lämsä, 2001].

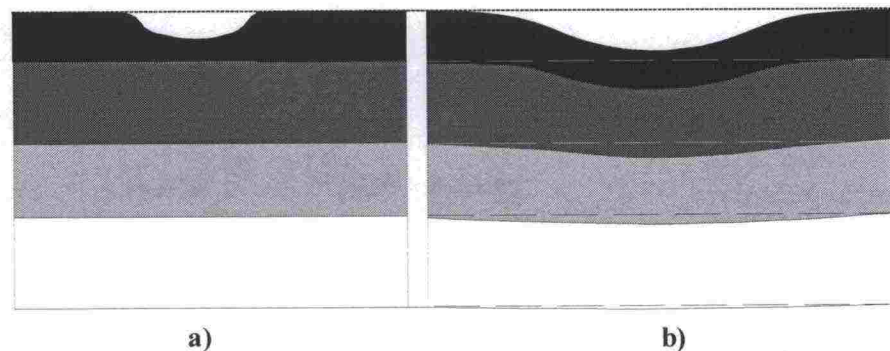
Koko Suomen tieverkon verkkohalkeaminen pinta-ala vuonna 2000 oli 7.3 milj.  $\text{m}^2$ . Jos oletetaan, että verkkohalkeilun leveys on keskimäärin yksi metri kaistaa kohti, on tiestöstä verkkohalkeillut runsaat 3600 km.

Verkkohalkeamien määrä on yksikerroksisilla AB-päällysteillä nelinkertaistunut vuodesta 1994 vuoteen 2000, mutta pysynyt samana paksupäällysteisillä AB-teillä. PAB-B -teillä verkkohalkeamat ovat puolestaan vähentyneet, mikä selittyy osittain vaurioituneimpien ja samalla vilkasliikenteisimpien teiden muuttamisilla AB-teiksi. PAB-v/o -teillä verkkohalkeamien määrä on lisääntynyt lievästi vuodesta 1994 vuoteen 2000. Jos vanhoja öljysorapäällysteitä ei uusita lähiaikoina merkittävässä määrin, verkkohalkeilu tulee lisääntymään ikääntymisen myötä voimakkaasti.

Koska pääosa verkkohalkeilusta tapahtuu ohutpäällysteisellä tiestöllä, verkkohalkeilu johtuu Suomen olosuhteissa pääasiassa sitomattoman rakenteen osan pysyvistä muodonmuutoksista. Perinteisen paksupäällysteisen tiestön verkkohalkeilun vähäisyys johtuu siitä, että vilkasliikenteiset tiet joudutaan päällystämään uudelleen pääasiassa nastarengaskulumisen takia ennen kuin väsymisvaurioita esiintyy merkittävästi.

### 5.2.2 Poikkisuuntainen epätasaisuus

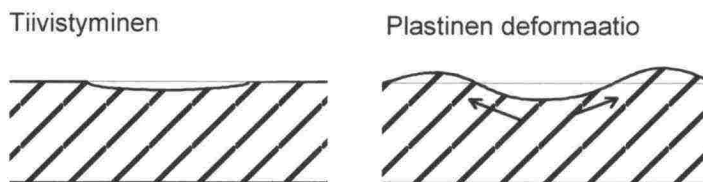
Poikkisuuntaisen epätasaisuuden eli urautumisen pääasialliset syyt ovat päällysteen kulumisen sekä päällysteen, sitomattomien päällysrakennekerrosten ja alusrakenteen pysyvät muodonmuutokset (kuva 30). Urautumista esiintyy tien poikkileikkauksessa pyörien kulku-urien kohdilla. Päällysteen kulumisen pääasiallinen syy on nastarengaskäyttö talviolosuhteissa. Kuluminen aiheuttaa tien pintaan yleensä jyrkkäreunaiset urat. Päällysteen kulumisen riippuu liikennemäärän ja nastoituksen lisäksi ennen kaikkea päällysteen runkokiviaineksen ominaisuuksista. Päällysteen kulumisen vuodessa oli 1990-luvun alkupuolella suuruusluokaltaan 0.25 mm KVL:n 1000 ajoneuvoa kohti [Lampinen, 1993]. Nykyisin kulumisen on enää karkeasti puolet johtuen päällysteiden paremmasta kulumiskestävyydestä ja tiukentuneista nastarengasmääräyksistä [Virtala ym., 2000].



Kuva 30. Poikkisuuntaisen epätasaisuuden eli urautumisen pääasialliset syyt a) kuluminen, b) pysyvät muodonmuutokset.

Raskas liikenne aiheuttaa päällysteen plastista deformaatiota ja tiivistymistä synnyttäen pysyviä muodonmuutoksia (kuva 31). Liikennekuormituksen aiheuttamat leikkausjännitykset synnyttävät plastista deformaatiota, mille on tunnusomaista materiaalin siirtyminen sivusuunnassa. Tiivistyminen johtuu raskaan liikenteen aiheuttamasta jälkitiivistymisestä. Plastinen deformaatio on tyypillistä kohteissa, missä raskaan liikenteen nopeus on alhainen kuten esim. linja-autopysäkeillä ja liittymissä. Perimmäinen syy päällysteen pysyviin muodonmuutoksiin on päällysteen viskoelastisuus, minkä seurauksena osa kuormitusten synnyttämistä muodonmuutoksista jää pysyviksi.

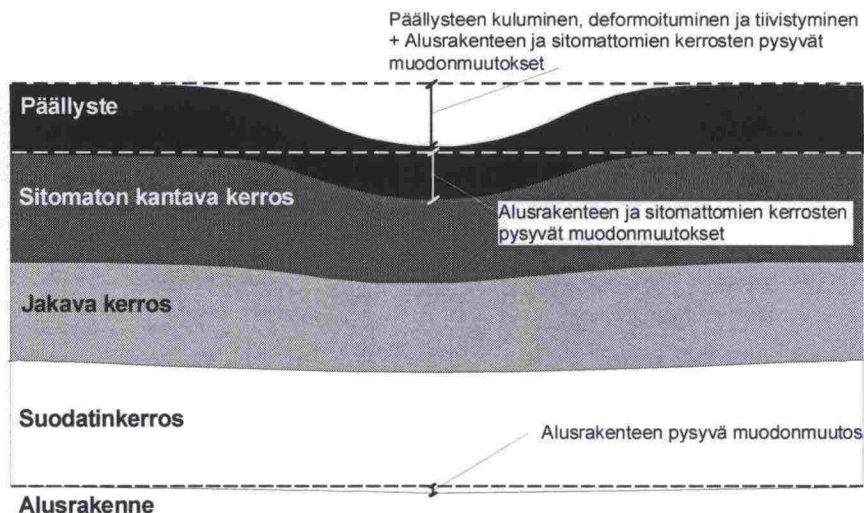




Kuva 31. Päällysteen pysyvien muodonmuutosten syntytavat [Huhtala, 1979].

Päällysteen pysyvien muodonmuutosten suuruus riippuu ulkoisista kuormitus- ja olosuhdetekijöistä sekä päällysteen ominaisuuksista. Kuormitus- ja olosuhdetekijöitä ovat mm. liikenteen määrä, kuormitusten suuruus, kuormitusaika (liikenteen nopeus) ja kuormitusten jakautuminen tien poikkileikkauksessa sekä päällysteen lämpötila. Pysyvien muodonmuutosten vastustuskykyyn voidaan vaikuttaa käytettävien materiaalien (sideaineen, lisäaineiden ja kiviaineksen) valinnalla, massan suhteutuksella ja huolellisella päällysteen valmistamisella eli tekijöillä, mitkä vaikuttavat päällysteen jäykkyyteen.

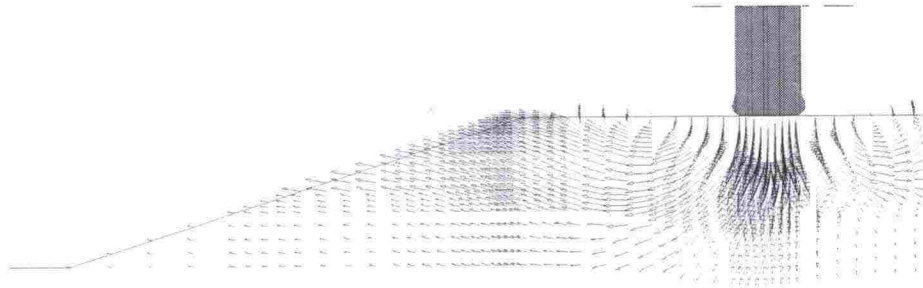
Tien pinnalla näkyvässä urautumisessa ovat mukana päällysteessä tapahtuvan urautumisen lisäksi sitomattomissa rakennekerroksissa ja alusrakenteessa syntyvät pysyvät muodonmuutokset (kuva 32).



Kuva 32. Urautumisen osatekijät.

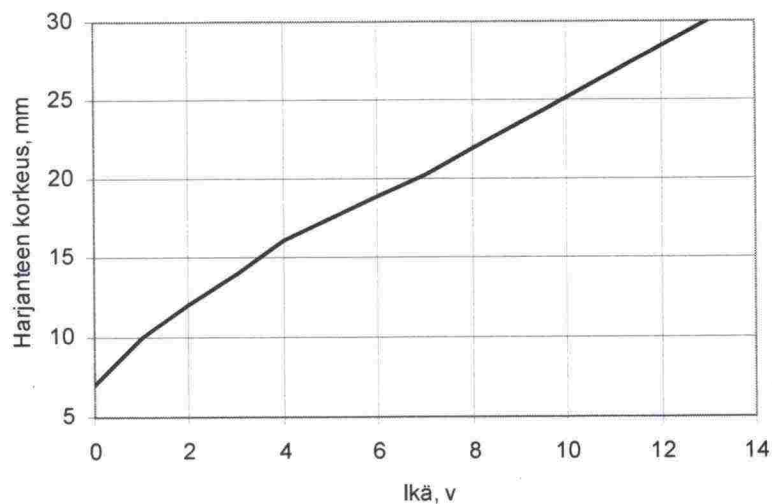
Liikenteen kuormittaessa tierakennetta sitomaton materiaali pyrkii siirtymään ajourien kohdalla alaspäin samalla syrjäyttäen vieressä olevaa materiaalia sivulle. Syrjäytyvä materiaali liikkuu sivulle ja ylöspäin pienintä vastusta kohden (kuva 33). Päällysteen alapuolisen rakenteen pysyvät muodonmuutokset ovat seurausta ajourien kohdalla tapahtuvasta sitomattoman materiaalin painumisesta ja ajourien välissä tapahtuvasta kohoamisesta. Sitomattomien materiaalien kosteudella on ratkaiseva merkitys pysyvien muodonmuutosten syntymiseen kriittisen ajankohdan ollessa yleensä roudan sulamiskausi.





Kuva 33. Siirtymävektorikuva kuormitetusta tierakenteesta FEM-laskennassa [Belt ym., 2000].

Sitomattomien kerrosten pysyvät muodonmuutokset ovat yleensä merkittäviä ohutpäällysteisillä alemman luokan teillä, joilla on tunnusomaista, että poikkileikkaus on kapea ja päällysrakenne usein ohut. Liikenteen kuormittamisessa kapeilla teillä reunan puoleinen osa materiaalista liikkuu pääasiassa vaakasuunnassa, mikä edesauttaa pysyvien muodonmuutosten kehittymistä päällysteen alapuolisessa rakenteessa. Ohuesta päällysteestä johtuen liikennekuormituksen aiheuttamat rasitukset ovat suuria varsinkin ylimmässä sitomattomassa kerroksessa, mikä myös lisää pysyviä muodonmuutoksia. Sitomattomien kerrosten pysyvistä muodonmuutoksista johtuva ajourien välisen harjanteen korkeus lisääntyy tasaisesti vuosittain (kuva 34).



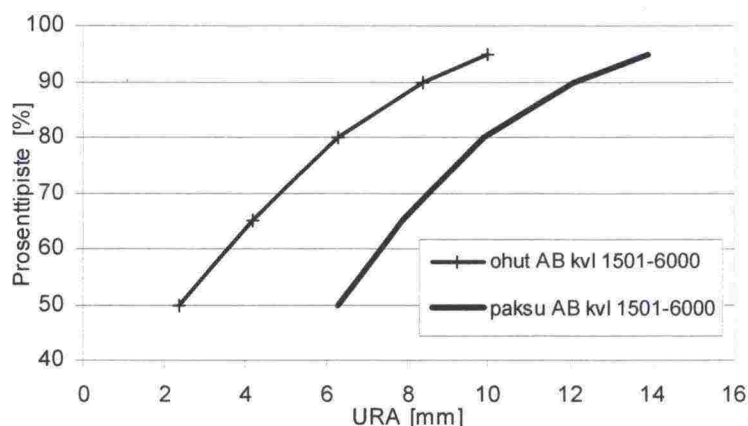
Kuva 34. Kestoikä tutkimuksen yhteydessä mitattu harjanteen korkeuden lisääntyminen Mt 935:llä [Belt, 1999].

Kapeilla ohutpäällysteisillä teillä tien poikkigeometria vaikuttaa merkittävästi poikkisuuntaisen epätasaisuuden eli ajourien välisen harjanteen muodostumiseen (taulukko 9). Mitä kapeampi tie tai jyrkempi luiskan kaltevuus sitä nopeampaa on harjanteen korkeuden kasvu. Esim. tien leveyden pieneminen 6.5 m:stä 5.5 m:iin luiskan kaltevuuden ollessa 1:3 harjanteen kasvunopeus lisääntyy 20 %.

Taulukko 9. Tien poikkigeometrian vaikutus harjanteen kasvunopeuteen kevytpäällysteisillä teillä HVS-testien perusteella.

Luiskan kaltevuus	Tien leveys, m		
	5.5	6.5	7.5
1:1.5	1.7	1.4	0.9
1:3	1.2	1.0	0.6
1:4	1.0	0.8	0.6

Kuntotietorekisterissä ajoradan poikkisuuntaista epätasaisuutta kuvataan AB-teillä urasyvyydellä (URA). Urasyvyys oli vuonna 2000 suurempi paksupäällysteisillä (> 80 mm) kuin ohutpäällysteisillä AB-teillä KVL-luokassa 1501-6000 ajon/vrk (kuva 35). Tähän vaikuttaa se, että ko. liikennemääräluokassa KVL painottuu AB2-teillä lähemmäs ylärajaa kuin AB1-teillä. Kaiken kaikkiaan urasyvyydet AB-teillä ovat pienehköjä, mikä johtuu siitä, että AB-tiet päällystetään uudelleen pääasiassa urasyvyyden perusteella.



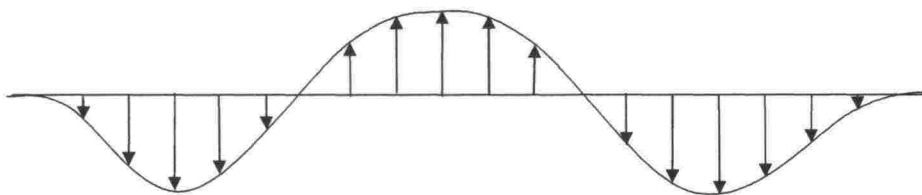
Kuva 35. Urasyvyyden jakauma prosenttipisteiden 50 ja 95 välillä vuonna 2000 [Lämsä, 2001].

Paksupäällysteisillä AB2-teillä urasyvyydet ovat lisääntyneet vuodesta 1994 vuoteen 2000 noin 10 %. Ohutpäällysteisillä AB1-teillä urasyvyydet ovat lisääntyneet vastaavana aikana peräti kolmanneksen.

Urautuminen johtuu AB-teillä pääasiassa nastarengaskulumisesta. Urautumista lisäävät päällysteen deformatuminen paksupäällysteisillä ja sitomattoman rakenteen osan pysyvät muodonmuutokset ohutpäällysteisillä AB-teillä.

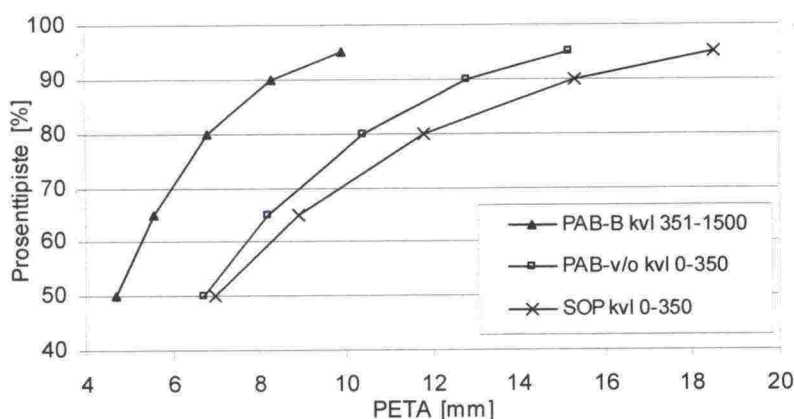
Tien poikkisuuntaista epätasaisuutta kuvataan kuntotietorekisterissä PAB- ja SOP-teillä ainakin toistaiseksi poikittaisella epätasaisuudella eli PETA:lla (kuva 36). Parhaillaan harkitaan ajourien välisen harjanteen korkeustietojen liittämistä kuntotietorekisteriin. Tämä johtuu siitä, että harjanteen korkeus on osoittautunut paremmaksi poikkisuuntaisen epätasaisuuden tunnusluvuksi kuin PETA. Sinänsä PETA ja ajourien välinen harjanteen korkeus korreloivat kohtuullisesti keskenään.

Mittausantureiden lukemien poikkeamien (perustasosta) itseisarvojen keskiarvo (mm)



Kuva 36. Poikittaisen epätasaisuuden (PETA) määritelmä.

PAB-B -teillä poikittainen epätasaisuus oli vähäistä (kuva 37). Sen sijaan päällystetyypeillä PAB-v/o ja SOP poikittainen epätasaisuus oli merkittävää, vaikka liikennemäärät olivat pieniä. Suuret PETA-arvot johtuvat mm. siitä, että ko. tiet ovat kapeita ja osittain jyrkkäluiskaisia sekä rakenteeltaan heikohkoja.



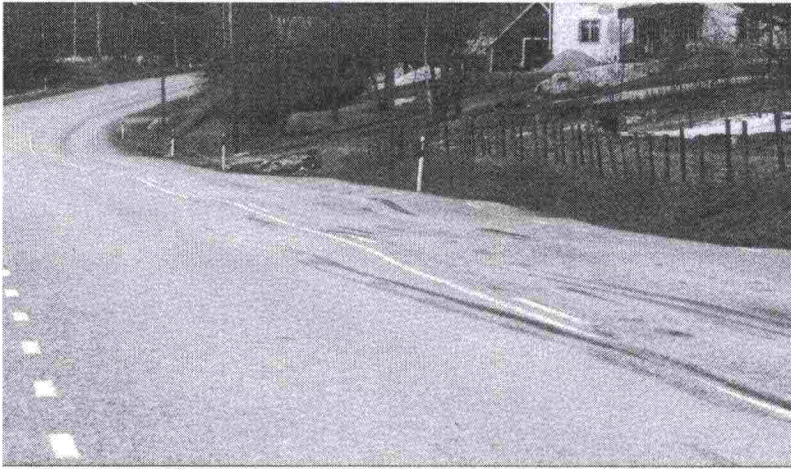
Kuva 37. PETA:n jakauma vuonna 2000 [Lämsä, 2001].

Poikittainen epätasaisuus on lisääntynyt keskimäärin vuosien 1994 ja 2000 välillä PAB-B -teillä vajaat 10 % ja PAB-v/o -teillä vajaat 20 %.

### 5.2.3 Pituussuuntainen epätasaisuus

Epätasaiset routanousut ja tierakenteen oman painon aiheuttamat painumat ovat tien pituussuuntaisen epätasaisuuden pääasialliset syyt (kuva 38). Painumat johtuvat alusrakenteen kokoonpuristumisesta, mitä esiintyy pääasiassa heikoilla alusrakennemateriaaleilla (savi, turve). Liikennekuormitus vaikuttaa pituussuuntaisen epätasaisuuden kehittymiseen dynaamisten rasitusten lisääntymisen kautta varsinkin siinä vaiheessa, kun jo esiintyy muista syistä johtuvaa pituussuuntaista epätasaisuutta.

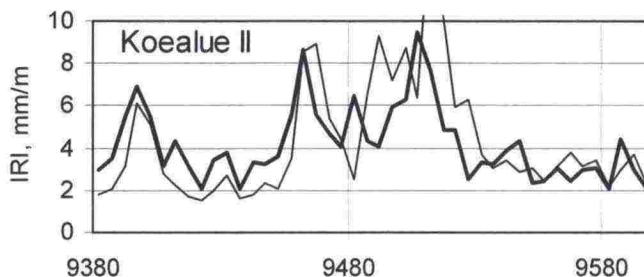




Kuva 38. Pituussuuntaista epätasaisuutta [Wågberg, 1991].

Epätasaisuutta aiheutuu myös mm. alusrakennemateriaalien ja olosuhteiden vaihteluista, tierakenteen epäjatkuvuuskohdista kuten rummuista yms. ja päällysrakenteen epähomogeenisuudesta (rakennepaksuuksien erot, materiaalien vaihtelut, puutteellinen ja epätasainen tiivistys). Eri tekijöiden osuus kulloinkin syntyvään epätasaisuuteen vaihtelee hyvin paljon ja keskinäisiä osuuksia on vaikea erottaa toisistaan. Suomessa routiminen on useimmissa tapauksissa tärkein syy pituussuuntaisten epätasaisuuksien syntymiseen [Ehrola, 1996]. Routanousujen lisääntyessä riski suurten pituussuuntaisten epätasaisuuksien esiintymiselle kasvaa merkittävästi, koska routanousujen epätasaisuus on yleensä sitä suurempaa mitä suurempia routanousut ovat.

Vertailtaessa keväällä ja kesällä määritettyjä pituussuuntaisia epätasaisuuksia, on havaittu kevyt- ja asfalttipäällysteisten teiden käyttäytymisen poikkeavan toisistaan. Kevytpäällysteisille teille on tyypillistä, että keväällä ja kesällä määritetyt pituussuuntaiset epätasaisuudet eivät useinkaan huomattavasti eroa toisistaan (kuva 39). Asfalttipäällysteisillä teillä pituussuuntaiset epätasaisuudet ovat keväällä usein selvästi suurempia kuin kesällä eli routanousujen aiheuttamat epätasaisuudet tasoittuvat rakenteen sulaessa ja tiivistyessä.

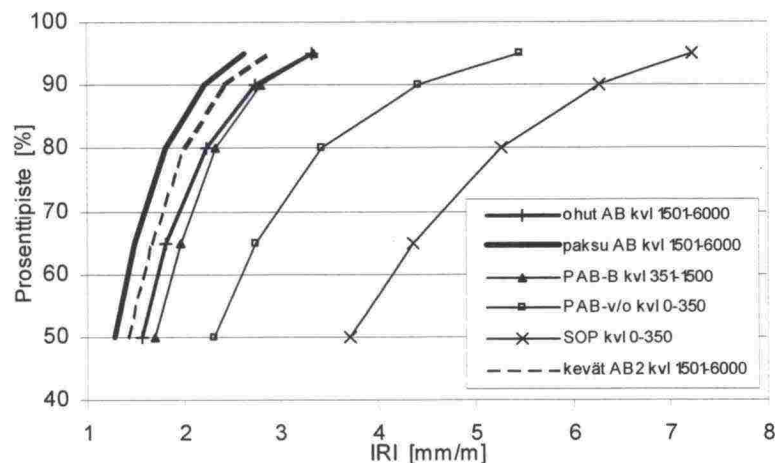


Kuva 39. Öljysorapäällysteiseltä Mt 935:ltä keväällä (paksu viiva) ja kesällä (ohut viiva) määritetyt pituussuuntaiset epätasaisuudet [Belt, 1999].

Kevytpäällysteisillä teillä keväällä, tierakenteen alkaessa sulaa, rakenteen kuormituskestävyys heikkenee huomattavasti. Tällöin liikennekuormitus aiheuttaa tien pinnan epätasaisuuksien seurauksena rakenteeseen suuria (dynaamisia) sysäyskuormituksia, minkä vuoksi jo sulaneeseen päällysrakenteen osaan syntyy helposti pysyviä muodonmuutoksia. Sulamisrintaman edetessä alusrakenteeseen, myös alusrakenteeseen alkaa muodostua pysyviä muodonmuutoksia sulamispehmenemisen seurauksena. Tienkohdisissa, missä routanousut ovat suuria, myös pysyvät muodonmuutokset ovat yleensä suuria. Tämän seurauksena pituussuuntaiset epätasaisuudet sijaitsevat yleensä samoilla kohdilla sekä talvella että kesällä [Belt ym., 2000a].

AB-päällyste on jäykempi kuin pehmeät päällysteet. Lisäksi asfalttipäällysteisillä teillä sitomaton päällysrakenne on usein suhteellisen paksu, jolloin päällysrakenne on yläosaltaan jäykkä ja toimii laattamaisesti. Tällaisella rakenteella routanousujen aiheuttamat epätasaisuudet palautuvat yleensä roudan sulaessa ilman, että rakenteeseen syntyy huomattavia pysyviä muodonmuutoksia.

Kuntotietorekisterin perusteella pituussuuntainen epätasaisuus oli vuonna 2000 suurinta SOP-teillä, missä lähes neljäsosalla IRI ylitti arvon 5 mm/m (kuva 40). PAB-v/o -teillä vastaavan IRI-arvon ylittävän tiestön osuus oli 8 %. IRI-arvoa 5 mm/m käytetään tasaisuuden kuntotavoitteena, kun nopeusrajoituksena on 70-80 km/h ja KVL on 350 ajon/vrk. PAB-B ja AB-teillä IRI-arvot olivat pieniä ja kuntotavoiterajan (2.7 mm/m, 100 km/h) ylittäviä osuuksia oli vähän. Keväällä roudan sulamisaikana määritetyt IRI-arvot olivat paksupäällysteisillä AB-teillä keskimäärin 10 % suuremmat kuin kesällä mitatut IRI-arvot.



Kuva 40. Pituussuuntainen epätasaisuus vuonna 2000 [Lämsä, 2001].

AB-teillä pituussuuntainen epätasaisuus on vähäistä. Tämä johtuu toisaalta paksusta päällysrakenteesta, jolloin IRI:n lisääntyminen on vähäistä, ja toi-



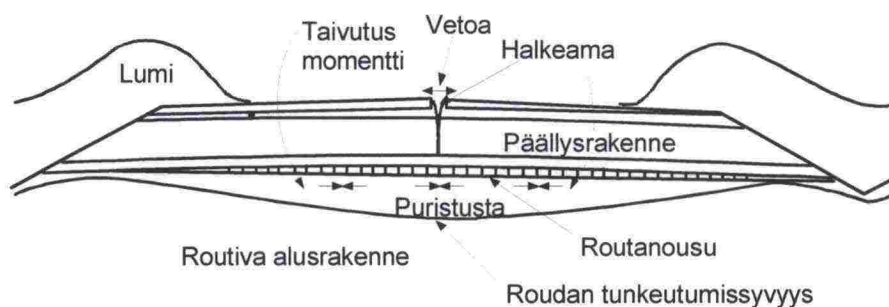
saalta siitä, että IRI-arvoa käytetään kunnostamiskriteerinä. Tällöin suuret pituussuuntaiset epätasaisuudet poistetaan kunnostamalla. Lisäksi nastarengaskulumisesta johtuva uudelleenpäälystäminen pienentää myös IRI-arvoa. PAB-v/o ja SOP-teillä suuret IRI-arvot johtuvat pääasiassa ohuesta ja usein rakentamattomasta päällysrakenteesta. Ohuella päällysrakenteella routanousujen epätasaisuus on suurta ja kuormituskestävyys alhainen.

Pituussuuntainen epätasaisuus on pienentynyt vuosien 1994 ja 2000 välillä eri päälystetyypeillä lukuun ottamatta SOP-teitä. Pahimmin epätasaisella 10 % tiestöstä IRI-arvoissa on hienoista kasvua myös PAB-v/o -teillä.

#### 5.2.4 Routanousujen aiheuttamat halkeamat

Routanousujen aiheuttamat halkeamat voivat olla pituushalkeamia tai muita ajokaistahalkeamia, jotka esiintyvät vinosti, poikkisuuntaisesti tai muuten epämääräisesti tien pituussuuntaan nähden. Vaikka halkeamat ilmenevät päällysteen halkeiluna, käytännössä halkeamat usein ulottuvat syvälle tierakenteeseen. Halkeamien perimmäisenä syynä on epätasaisen routanousujen aiheuttama vetorasitus päällysrakenteen yläosassa. Routanousun aiheuttaman vetorasituksen ylittäessä rakenteen lujuuden, tierakenteeseen muodostuu halkeamia päällysrakenteen yläosasta alkaen.

Tien pituussuuntaisen routahalkeaman muodostumisen syy on tien poikkileikkauksen epätasaisessa routimisessa, joka aiheutuu tien reunoille ja sivuosiin talven aikana aurauksen myötä kertyneistä lumikinoksista. Kinokset toimivat tehokkaana lämpöeristeenä, jolloin routan syvyys ja sitä kautta routanousut ovat tien reunaosilla ajoradan keskiosaa pienempiä (kuva 41).



Kuva 41. Pituussuuntaisen routahalkeaman syntyminen tien keskialueelle [Nordal ja Refdal, 1989].

Poikkileikkauksen epätasainen routanousu aikaansaa päällysrakenteen yläosaan ajoradan keskiosilla vetojännityksiä, jotka kasvavat, kun routanousuo tien keskiosan ja reunojen välillä lisääntyy. Päällysrakenteen yläosan vetojännityksiä voidaan arvioida epäsuorasti tien keskilinjaa ja reunan routanousuerolla tai routanousueron aiheuttamalla kulmanmuutoksella. Kenttähavaintojen perusteella kriittinen kulmanmuutos on luokkaa 1.5 - 2.0 %, mikä vastaa 26 - 35 mm routanousueroa 7.0 m tien leveydellä [Ehrola, 1996].

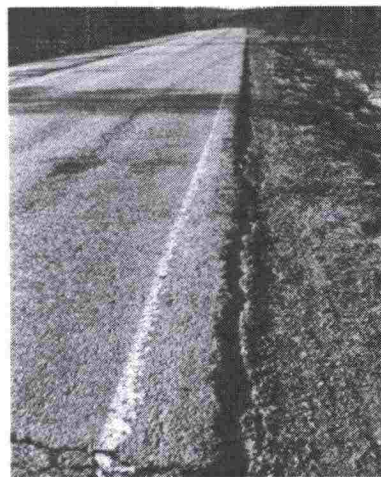


Kapeahko pituushalkeama tien keskiosalla ei sinänsä ole suuri haitta liikenteelle, mutta halkeaman alue on altis vaurioitumaan lisää liikennekuormitusten seurauksena (kuva 42).



*Kuva 42. Liikennekuormitusten aikaansaama pituushalkeaman laajentuminen [Heikkilä, 1982].*

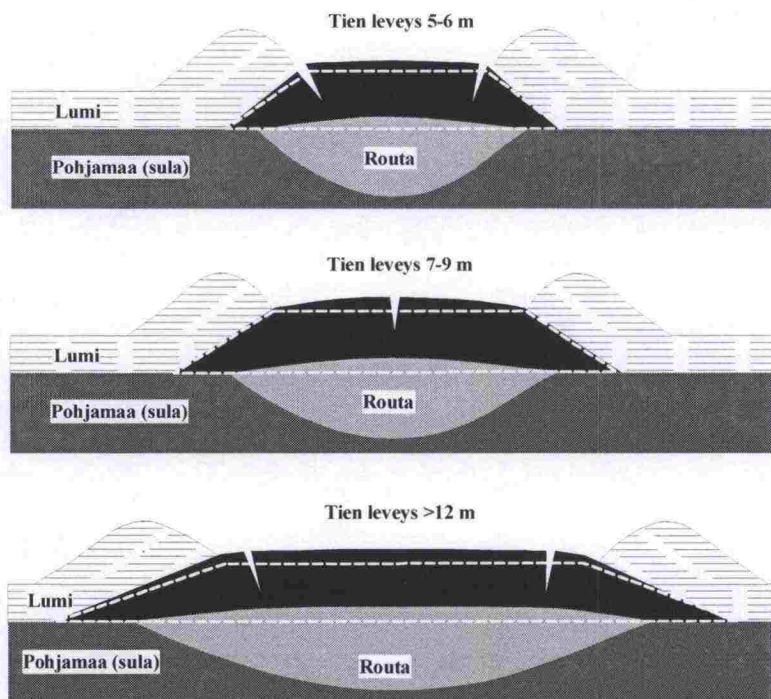
Tien reunoilla olevan lumen eristysvaikutuksen seurauksena saattaa muodostua merkittävä routanousuero myös tien reunaosan ja lähes sulana pysyvän pientareen ulkoreunan välille. Tällöin halkeama syntyy tien reuna-alueelle useimmiten päällysteen reunaan (kuva 43). Kenttähavaintojen perusteella tien reuna-alueiden kriittinen routanousu on 50 - 60 mm.



*Kuva 43. Pituussuuntainen routahalkeama tien reunassa [Heikkilä, 1982].*

Eri levyisillä teillä reuna-alueiden lumikinoksilla on erilainen vaikutus poikkileikkauksen routaantumiseen ja routamiseen, mistä syystä pituushalkeamien sijainti tien poikkileikkauksessa riippuu tien leveydestä. Kun tie on leveydeltään luokkaa 7-9 m, pituushalkeama sijaitsee todennäköisimmin tien keskellä (kuva 44). Reunahalkeamat ovat tien keskiosiin muodostuvia halkeamia

yleisempiä kapeilla (5-6 m) ja myös hyvin leveillä (11-12 m) teillä [Gandahl, 1974].



Kuva 44. Pituushalkeamat ja tien leveys.

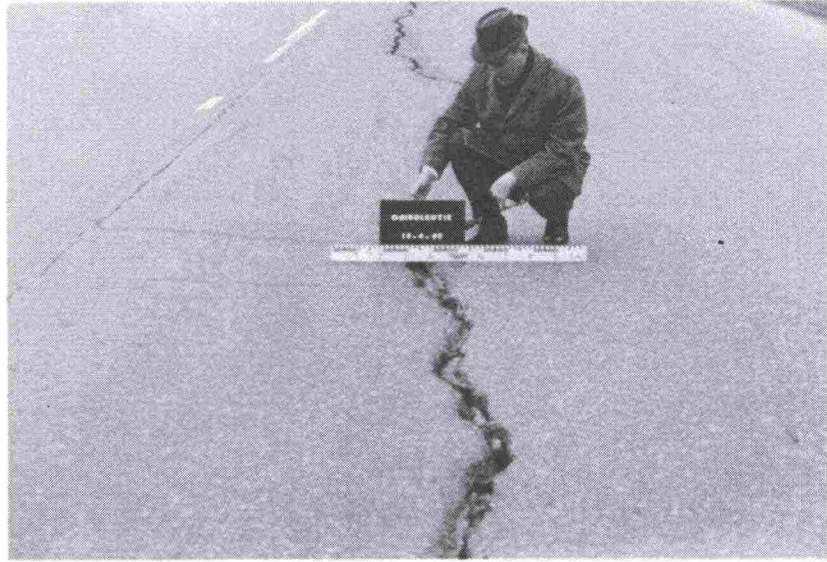
Leveillä teillä (leveys 11-12 m) lumikinosten vaikutus ulottuu vain tien reunaosille, jolloin tien keskiosilla routaantuminen ja routanousu ovat jokseenkin tasaisia. Tällöin tien keskiosalle ei synny routanousueroja eikä myöskään halkeamia. Routanousueroja ja sitä kautta halkeamia saattaa sen sijaan muodostua tien reunaosalle.

Kapeilla teillä (leveys 5-6 m) pituussuuntaiset routahalkeamat syntyvät myös useimmiten tien reunoille. Kapeissa teissä routaantumisen epätasaisuudesta huolimatta jäänyt tierakenne toimii (nousee ylös) ajoradan alueella yhtenäisenä laattana, jolloin halkeamat syntyvät tien reunoihin.

Suomen tiestön yleisillä leveyksillä (7-9 m) pituussuuntainen routahalkeama syntyy useimmiten tien keskialueille. Tällöin tien poikkileikkauksen routaantumisen, routimisen ja halkeaman muodostumisen tilanne on edellä esitetyn kuvan 41 mukainen.

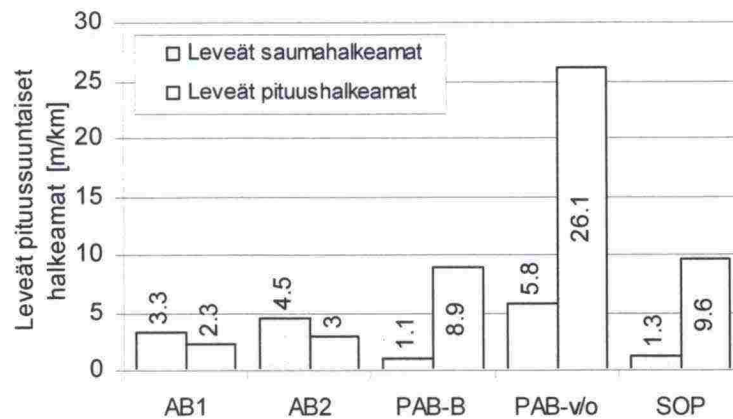
Ajokaistahalkeamia esiintyy tyypillisesti tiekohdissa, missä rakenne sisältää jonkinlaisen epäjatkuvuuskohdan, jossa routivuuserot ovat paikallisesti huomattavia (kuva 45). Tierakenteen epäjatkuvuuskohtana voi olla jokin rakenteen osa, kuten rumpu, salaoja, putkijohto tai päällysrakennepaksuuden muutos, jotka hyvin usein sisältävät sinänsä routanousueroja tasoittavan siirtymäkiilarakenteen. Epäjatkuvuuskohdan voi aiheuttaa myös alusrakenteen materiaalin huomattava muuttuminen tai tien leventäminen.





Kuva 45. Asfalttipäällysteisen tien ajokaistalle syntynyt routahalkeama [Ehrola, 1996].

Leveät pituus- ja poikkisuuntaiset halkeamat ovat pääosin routimisesta johtuvia. Kuntotietorekisterin perusteella routahalkeamien suhteellinen määrä oli vuonna 2000 suurin PAB-v/o- teillä, missä mm. yli 20 mm leveitä pituushalkeamia oli tiekilometriä kohti noin kymmenkertainen määrä AB-teihin verrattuna (kuva 46). AB-teillä leveitä saumahalkeamia oli muista teistä poiketen hieman enemmän kuin leveitä pituushalkeamia, mikä osaltaan johtuu teiden leveydestä.

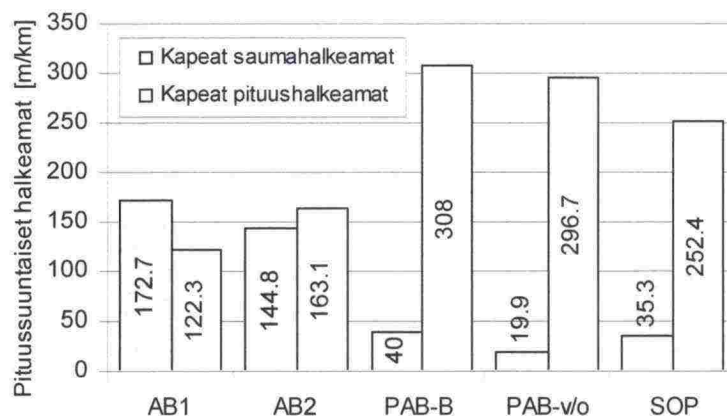


Kuva 46. Leveät pituus- ja saumahalkeamat kilometrille vuonna 2000 [Lämsä, 2001].

Myös leveiden poikkihalkeamien suhteellinen määrä päällystetyillä teillä oli suurin (2.3 kpl/km) PAB-v/o -teillä. Ohutpäällysteisillä AB-teillä niitä oli 1 kpl/km ja paksuilla AB-teillä 0.3 kpl/km.



Myös kapeat pituus- ja saumahalkeamat ovat suurimmaksi osaksi routimisen aiheuttamia. Kapeiden  $\leq 20$  mm pituussuuntaisten halkeamien suhteellinen määrä vuonna 2000 oli huomattavan suuri, sillä niitä oli päällystetyllä tiestöllä keskimäärin 300-350 m/km osan ollessa limittäin (kuva 47). Pituussuuntaisten halkeamien yhteispituuden jakauman perusteella lähes 60 % 100 m:n tieosuuksista sisälsi jonkin asteisia pituushalkeamia. Viidesosalla tiestöstä halkeamapituus oli vähintään 60 m/100 m.



Kuva 47. Kapeat pituus- ja saumahalkeamat kilometrille vuonna 2000 [Lämsä, 2001].

Koko Suomen yleisellä tiestöllä oli vuoden 2000 aineiston perusteella laskettuna 15 900 km kapeaa pituussuuntaista halkeamaa, mistä 6 370 km oli PAB-v/o ja 5 460 km AB-teillä. Myös PAB-B -teillä halkeamapituus oli suuri, yli 3 000 km. AB-teillä sauma- ja pituushalkeamien osuus oli suunnilleen yhtä suuri, mutta PAB ja SOP-teillä noin 90 % pituussuuntaisista halkeamista oli pituushalkeamia.

Pituussuuntaiset halkeamat ovat lisääntyneet eri päällystetyypeillä vuosien 1994 ja 2000 välillä keskimäärin 15 %. Ohutpäällysteisillä AB1-teillä kasvua oli peräti 40 %. Koko Suomen tiestöllä pituussuuntaisten halkeamien yhteispituus on lisääntynyt kuudessa vuodessa yli 2900 km. Nykyisin yleisesti käytettävillä suhteellisen keveillä korjaustoimenpiteillä ei pystytä vähentämään pituushalkeamien määrää.

### 5.2.5 Pakkaskatkot

Talvella päällysteen lämpötilan alenemisesta päällystelähtään syntyvät ve-tojännitykset aiheuttavat pakkashalkeamia eli pakkaskatkoja (kuva 48). Pakkashalkeamat syntyvät päällysteen pintaan, jossa lämpötilan muutos ja sitä kautta kutistumisjännitykset ovat suurimmillaan. Pinnasta halkeamat etenevät lämpötilan laskiessa ja jännitysten kasvaessa läpi päällysteen. Käytännössä päällysteeseen syntyy yleensä säännöllisin välein tien poikisuuntaisia halkeamia, jotka katkaisevat päällysteen ja usein myös päällysteen alla olevat kerrokset [Ehrola, 1996].

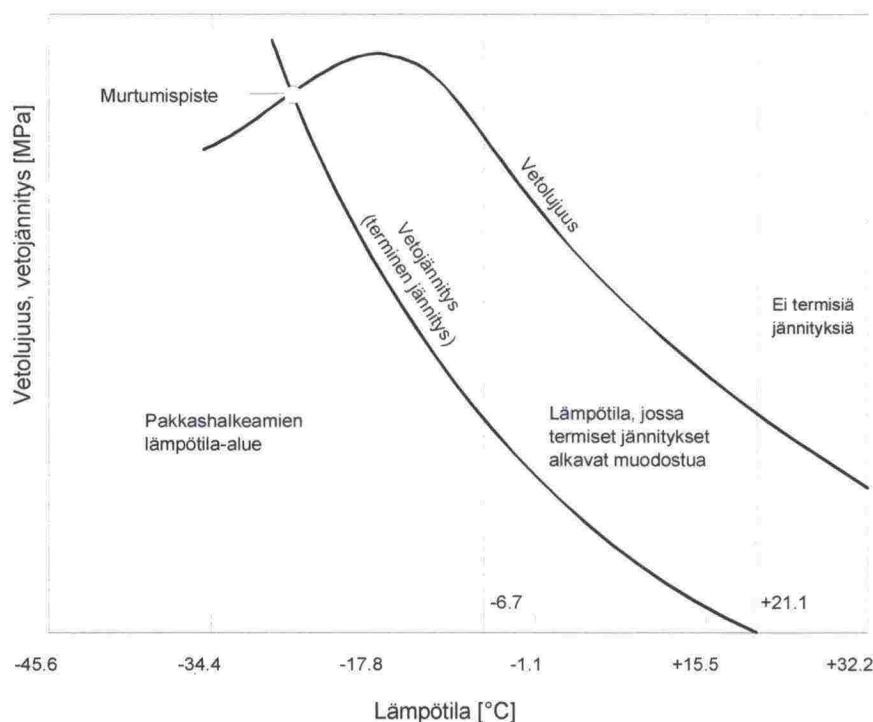


Kuva 48. Paikattuja pakkashalkeamia asfalttipäällysteisellä tiellä [Ehrola, 1996].

Termisten vetojännitysten syntyminen perussyy on se, että päällystelaatta pyrkii kutistumaan lämpötilan laskiessa, mutta kutistuminen on käytännössä estynyt päällysteen ja alustan välisen tartunnan vuoksi. Lämpö- eli termisten jännitysten muodostumiseen vaikuttaa myös viskoelastisuudesta johtuva jännitysten purkautuminen eli relaksoituminen. Termiset jännitykset häviävät korkeissa lämpötiloissa käytännössä kokonaan, mutta alhaisissa lämpötiloissa relaksoituminen on enää hyvin vähäistä. Alle  $+ 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötiloissa päällysteen lämpötilan laskiessa termiset jännitysten alkavat kasvaa kiihtyvällä nopeudella (kuva 49). Samanaikaisesti myös päällysteen vetolujuus kasvaa joskin hitaammin kuin termiset jännitykset. Tietyn lämpötilan jälkeen vetolujuus alkaa kuitenkin laskea. Termisten jännitysten ylittäessä päällysteen vetolujuuden päällystelaattaan syntyy halkeama [Haas ym., 1989].

Lämpöjännitysten suuruus ja halkeiluherkkyys riippuvat päällysteen ominaisuuksista, tierakenteesta, ympäristötekijöistä ja päällysteen iästä. Perustekijä päällysteen suhteen on sen lämpölaajenemis- ja kutistumisominaisuksilla. Käytännössä tärkein tekijä päällysteessä on sideaine sekä sen kovuusominaisuudet ja lämpötilaherkkyys, koska päällysteen jäykkyys riippuu ennen kaikkea bitumin ominaisuuksista. Mitä suurempi on päällysteen jäykkyys, sitä alttiimpi se on pakkashalkeilulle. Päällysteen iän vaikutus pakkashalkeamien kehittymiseen on seurausta sideaineen kovenemisestä ja sen myötä tapahtuvasta päällysteen jäykkyyden kasvusta.





Kuva 49. Asfalttipäällysteiden pakkaskatkojen syntymisen periaate ja lämpötila-alue.

Ympäristökijöistä alhainen lämpötila ja suuri jäähtymisnopeus ovat pakkashalkeamien syntymisen perustekijöitä. Mitä alhaisemmaksi päällysteen lämpötila laskee, sitä suuremmaksi lämpöjännitykset kasvavat. Mitä nopeammin päällysteen lämpötila laskee, sitä vähemmän ehtii tapahtua jännitysten relaxoitumista.

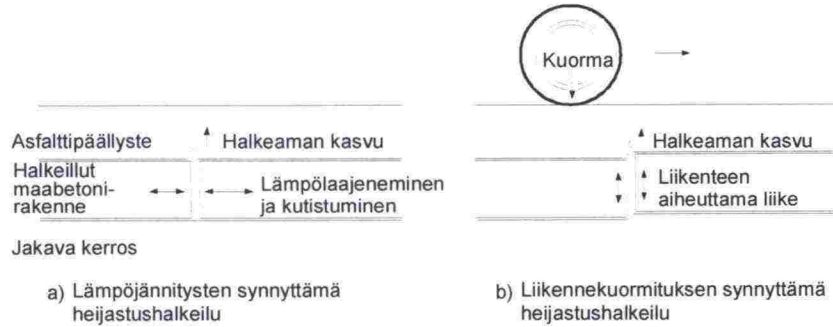
Kapeat poikkihalkeamat ovat suurimmaksi osaksi termisten jännitysten aiheuttamia. Kuntotietorekisterin perusteella kapeita poikkisuuntaisia halkeamia oli päällystetyllä tiestöllä keskimäärin 10 kpl/km, lukuun ottamatta paksupäällysteisiä AB-teitä, missä poikkihalkeamia oli 20 kpl/km. Lähes puolet kaikista poikkihalkeamista oli paksupäällysteisillä AB-teillä. Paksupäällysteisten AB-teiden runsas poikkihalkeamien määrä johtuu pääasiassa muita päällystetyyppejä jäykemmästä sideaineesta, mikä aiheuttaa päällysteen herkkyyden pakkaskatkoille. Uudelleen päällystämällä poikkihalkeamien määrää ei juurikaan pystytä vähentämään johtuen heijastushalkeilusta. Poikkihalkeamien määrä on lisääntynyt AB- ja PAB-teillä vuodesta 1994 vuoteen 2000 1.5-2 -kertaisiksi.

### 5.2.6 Heijastushalkeilu

Heijastushalkeilulla tarkoitetaan päällystekerroksen alapuolisissa kerroksissa olevien tai sinne syntyvien halkeamien kulkeutumista tien pintaan. Heijastushalkeilu on tyypillistä maabetonirakenteille, mutta se on yleistä myös tavanomaisilla tierakenteilla uudelleen päällystyksen yhteydessä. Maabetonirakenteilla lämpötilamuutosten synnyttämien lämpöjännitysten katsotaan



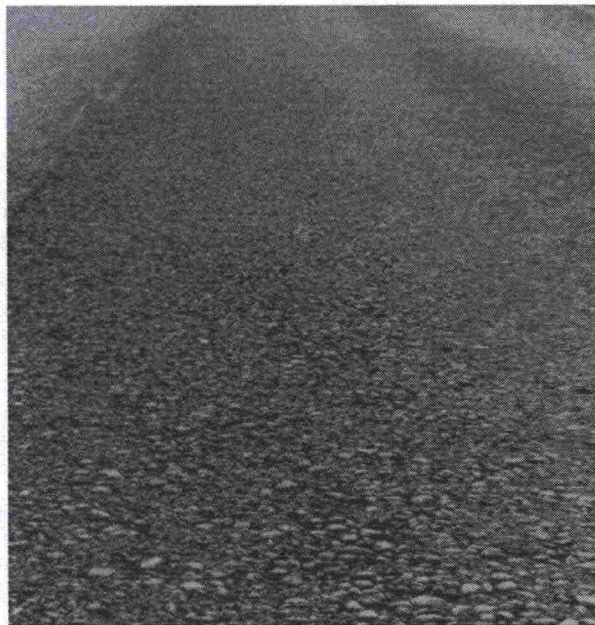
olevan perussyö heijastushalkeilun käynnistymiseen (kuva 50 a). Liikennekuormituksen aiheuttamat jännitykset puolestaan edesauttavat halkeaman tunkeutumista päällysteen läpi (kuva 50 b). Periaatteessa kaikki eri tyyppiset halkeamat voivat heijastua uuteen päällysteeseen.



Kuva 50. Heijastushalkeilun muodostumismekanismit maabetonirakenteessa [Nunn, 1989].

### 5.2.7 Muut vauriot

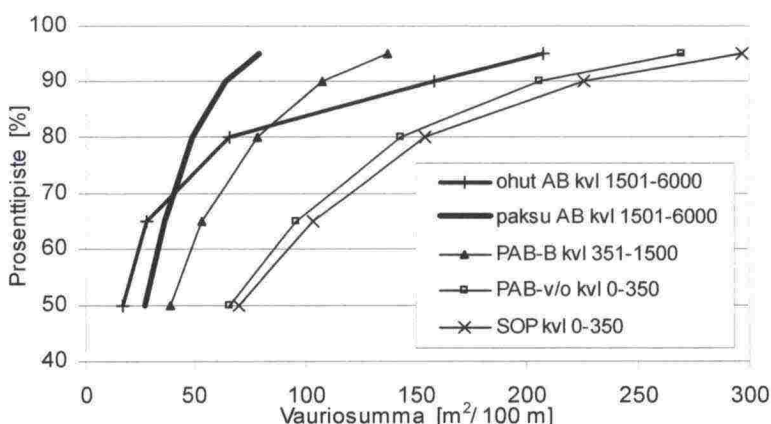
Tyypillisiä materiaali- ja työvirheistä johtuvia vaurioita ovat erilaiset purkaumat (kuva 51) ja reiät sekä osittain myös saumahalkeamat. Purkautuvan päällysteen pinnasta irtaantuu kokonaisia kiviainesrakeita. Purkautumisen perussyynä on sideaineen ja kiviainesrakeiden välisen sidoksen pettäminen. Reikä on puolestaan pitkälle kehittynyt purkauma. Materiaali- ja työvirheistä aiheutuu uusilla päällysteillä myös sideaineen pintaan nousua, mitä ei voida kuitenkaan pitää varsinaisena vauriona vaan liikenneturvallisuutta heikentävänä tekijänä.



Kuva 51. Päällysteen purkauma.

### 5.2.8 Vauriosumma

Vauriosummalla kuvataan määritelmänsä mukaisesti rikkiäisen päällysteen pinta-alaa 100 tiemetriä kohti. Kuntotietorekisterin perusteella vauriosumma oli vuonna 2000 suurin päällystetyypeillä PAB-v/o ja SOP ja vastaavasti pienin AB-teillä (kuva 52). Keskimäärin vauriosumma ei ollut kovinkaan suuri, mutta pahimmin vaurioituneilla teillä vauriosumma oli huomattava, mistä voidaan päätellä, että varsinkin alemmalla tieverkolla on paljon todella heikkokuntoisia teitä. Koska vauriosummaan vaikuttavat käytännössä eniten verkko- ja pituushalkeamat, siihen vaikuttavat syyt ovat samat kuin ko. vauriotyypeillä.



Kuva 52. Vauriosumman jakauma vuonna 2000 [Lämsä, 2001].

Paksupäällysteisten AB-teiden vauriosumman vähäisyys johtuu osaksi siitä, että nykyisin vauriosumma ei sisällä ko. teille tavanomaisinta vauriotyyppiä eli pakkaskatkoja. Tienkäyttäjän ja rakenteen toiminnan kannalta pakkaskatkot ovat kuitenkin merkittäviä.

Vauriosumman keskimääräinen arvo on kasvanut vuosien 1994 ja 2000 välillä selvästi lukuun ottamatta PAB-B -teitä. Vauriosumman kasvu johtuu pääasiassa pituus- ja poikkihalkeamien lisääntymisestä.

### 5.3 Tiestön kunto ja sen kehittyminen

Päällystetty tiestö on keskimäärin kohtuullisen hyvässä kunnossa, mutta varsinkin alemmalla tieverkolla on paljon myös hyvin heikkokuntoisia tieosuuksia. Vuosien 1994 ja 2000 kuntotietorekisterin perusteella erilaiset päällysteen pintavauriot ovat lisääntyneet selvästi. Alemmalla tieverkolla vauriosumma on suhteellisen suuri ja vauriot ovat tyypillisimmin verkko- ja pituushalkeamia. AB-teille puolestaan on ominaista suuri pituus- ja saumahalkeamien sekä poikkisuuntaisten halkeamien määrä. Erityisen huomattavaa vaurioiden lisääntyminen päällystetyllä tiestöllä on ollut pituus- ja poikkihalkeamien suhteen.



Pintavaurioiden lisääntymisestä huolimatta pituussuuntainen epätasaisuus on keskimäärin hieman parantunut. Myös poikkisuuntainen epätasaisuus on alemman tieverkon heikkokuntoisimmilla tieosuuksilla hieman pienentynyt. Urasyvyys AB-teillä on kuitenkin kasvanut.

Kunnostamattomalla tiestöllä verkko- ja pituushalkeamien lisääntyminen oli vuosien 1994 ja 2000 välillä huomattavaa PAB-v/o -teillä (taulukko 10). Sau- ma- ja poikkihalkeamat lisääntyivät selvästi paksupäällysteisillä AB-teillä.

*Taulukko 10. Päällystevaurioiden vuosittainen lisääntyminen vuosien 1994-2000 välillä 100 m kohti, kun ei ole tehty parantamis- tai korja-ustoimenpiteitä [Lämsä, 2001].*

Päällystelaji	Verkkohalk. m <sup>2</sup> /100 m	Routanousun aiheuttamat halkeamat			Kapeat pi- tuushalk. m /100 m	Kapeat saumahalk. m /100 m	Kapeat poikkihalk. kpl /100 m
		Leveät pi- tuushalk. m /100 m	Leveät saumahalk. M /100 m	Leveät poikkihalk. kpl /100 m			
paksu AB	0.3	0.01	0.05	0.004	1.10	1.22	0.19
PAB-B	0.9	0.06	0.01	0.008	1.38	0.05	0.12
PAB-v/o	3.1	0.34	0.05	0.040	1.13	-0.21	0.07
Pääl. tiestö keskimäärin	2.0	0.20	0.04	0.024	1.16	0.23	0.11

Viime aikoina vallitsevana olleilla suhteellisen kevyillä korjaustoimenpiteillä päällystetyn tiestön kunto on saatu pysymään pituus- ja poikkisuuntaisen epätasaisuuden osalta hyvässä kunnossa. Sen sijaan erilaiset pintavauriot, varsinkin pituus- ja poikkisuuntaiset halkeamat, ovat kuitenkin lisääntyneet vuosittain tehdyistä toimenpiteistä huolimatta.

## 5.4 Vaurioiden merkitys

### 5.4.1 Tien toiminnallinen ja rakenteellinen kunto

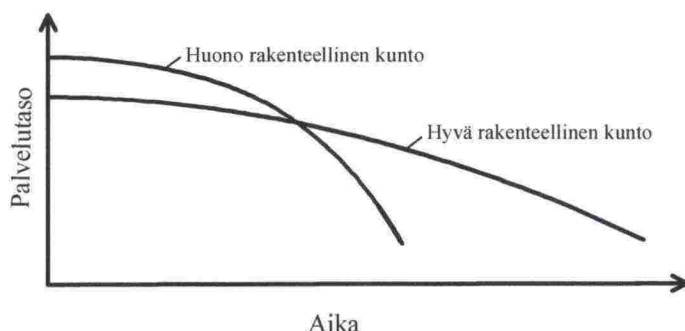
Vaurioitumisen merkitystä voidaan arvioida tien toiminnan perusteella joko itse tierakenteen tai liikenteen eli tienkäyttäjän kannalta. Tarkasteltaessa tien toimintaa käyttäjän kannalta puhutaan tien toiminnallisesta kunnosta, mikä liittyy läheisesti tien käyttöominaisuuksiin kuten ajomukavuuteen, -kustannuksiin ja -turvallisuuteen. Ajomukavuus riippuu pääasiassa pituussuuntaisesta epätasaisuudesta ja ajoturvallisuus Suomen olosuhteissa poikkisuuntaisesta epätasaisuudesta. Erilaiset halkeamat ja paikkaukset ovat toiminnallisen kunnan kannalta lähinnä esteettisiä tekijöitä.

Tien toimintaa rakenteelliselta kannalta tarkasteltaessa puhutaan tien rakenteellisesta kunnosta, mikä kuvaa tierakenteen kykyä kestää liikennekuormituksesta ja ilmasto-olosuhteista aiheutuvia rasituksia. Rakenteellisen kunnan perusteella pyritään arvioimaan, kuinka kauan tien toiminnallinen kunto eli palvelutaso pysyy halutulla tasolla [Ullidtz, 1987].

Tien rakenteellinen kunto vaikuttaa merkittävästi toiminnallisen kunnan kehittymiseen (kuva 53). Tierakenteen kestävyys liikennekuormituksen suh-



teen voi olla hyvä, vaikka tien pinta ei olisikaan erityisen tasainen tai siinä esiintyisi esim. nastarenkaiden aiheuttamaa kulumista. Toisaalta tierakenteen kuormituskestävyys voi olla heikko, vaikka tien pinnassa ei ole vielä näkyviä vaurioita. Hyvän kuormituskestävyyden omaavan rakenteen kuntotila pysyy suhteellisen vakiona pitkän ajanjakso, kun taas huono rakenteellinen kunto merkitsee nopeaa tierakenteen vaurioitumista.



Kuva 53. Tien rakenteellisen kunnon vaikutus toiminnalliseen kuntoon.

Tien rakenteellisen kestävyys- eli mitoitusmenetelmien käytökelpoisuutta kuvaa se, kuinka hyvin ne pystyvät ennustamaan tien toiminnallista kuntoa. Rakenteellinen kunto on kiinnostava vain siinä suhteessa, kuinka se vaikuttaa toiminnalliseen kuntoon tulevaisuudessa. Käytännössä tierakenteen toiminnallista ja rakenteellista kuntoa ei voida yhdistää yhdeksi tekijäksi.

Tierakenteiden ns. mekanistis-empiirisessä mitoittamisessa rakenteellista kuntoa kuvataan kriittisten rasitusten avulla. Kriittisten rasitusten ja toiminnallisen kunnon väliset yhteydet määritetään kenttähavaintojen perusteella. Kenttähavainnoilla selvitetään, kuinka monta tietyn suuruista rasitusta tarkasteltava tierakenne kestää eli määritetään tierakenteen kestoikä.

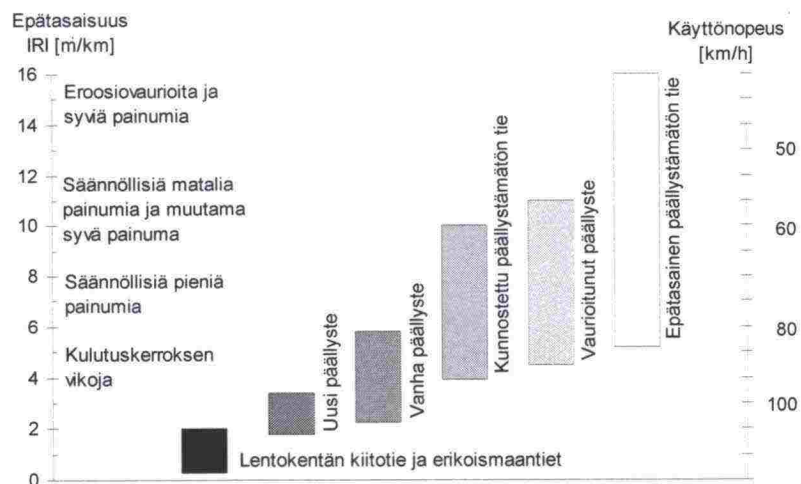
Rakenteen parantamisen mitoittamisessa kriittisten rasitusten ja toiminnallisen kunnon välisen yhteyden määrittämisessä hyödynnetään parannettavalta tieltä määritettyjä vasteita sekä tien aikaisempaa vaurioitumiskehitystä. Suurena ongelmana ovat rakentamattomat tiet, joilla parantamistoimenpiteiden vaikutusten arviointia vaikeuttaa rakenteiden epähomogeenisuus.

#### 5.4.2 Vaurioiden liikenteellinen merkitys

Tien käyttäjän kannalta liikenneväylän pinnan tulee olla turvallinen, miellyttävä ja taloudellinen ajaa. Lisäksi tiellä liikkumisen tulisi aiheuttaa mahdollisimman vähän ympäristöhäiriöitä kuten melua, tärinää, veden roiskumista tai kulumisesta johtuvaa pölyä. Ajoradan pinnan turvallisuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat kitka, tasaisuus ja valonheijastuvuus. Ajomukavuuteen vaikuttavat tasaisuus, melu ja valonheijastuvuus. Ajon taloudellisuus on yhteydessä päällysteen pintarakenteeseen ja vierintävastukseen [Ehrola, 1996].

Liikenneväylän pintarakenne ja epätasaisuus synnyttävät väylällä liikkuvaan ajoneuvoon erilaisia liikkeitä, minkä ihminen kokee usein haitallisena ja epämiellyttävänä. Ihminen on herkin pystysuuntaiselle liikkeelle. Ajoradan pinnan (pituussuuntaisten) epätasaisuuksien vaikutusta henkilöauton pystysuuntaiseen värähtelyyn kuvataan IRI-arvolla (International Roughness Index). IRI (mm/m tai m/km) määritetään siten, että tien pituusprofiiliin sijoitetaan laskennallisesti kulkemaan vakionopeudella 80 km/h tietyt rengas-, jousi- ja iskunvaimennintekijät omaava neljännesauto (Quarter Car Simulator). Neljännesauton pystysuuntaisista liikkeistä lasketaan ajoneuvon jousitetun (kori) ja jousittamattoman (akseli, pyörä) massan välinen liike, mikä ilmaistuna tien pituusyksikköä kohti on IRI-arvo.

Päällysteen ollessa uusi IRI-arvo on pieni (kuva 54). Päällysteen ikääntyessä ja vaurioituessa IRI-arvo kasvaa. Pahoin vaurioituneella päällystetyllä tiellä IRI-arvo on moninkertainen uuteen päällysteeseen verrattuna. Sorapintaisilla teillä IRI-arvot ovat huomattavan korkeita kunnostettunakin verrattuna päällystettyihin teihin.

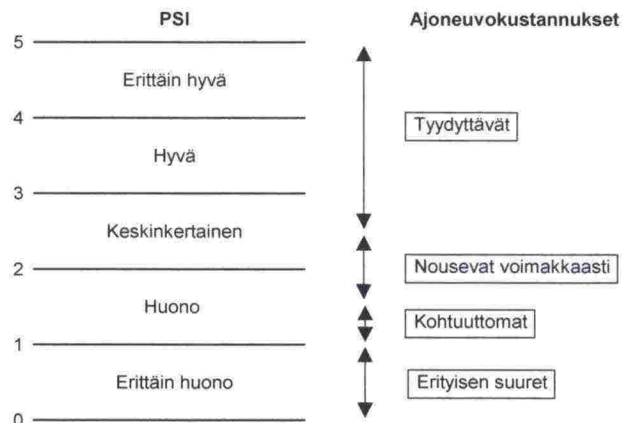


Kuva 54. Päällysteen kunnon ja IRI-arvon välinen yhteys [Smith ja Brooker, 1992].

Tien poikkiprofiililla on myös merkitystä tien käytettävyyteen. Myös poikkisuuntainen epätasaisuus lisääntyy pituussuuntaisen epätasaisuuden tavoin aikaa myöten liikenteen ja ilmastokuormien seurauksena. Tien pinnan urautuminen heikentää ajoturvallisuutta lähinnä uriin kertyneen veden seurauksena. Lisäksi syvät urat alentavat ajomukavuutta.

AASHO-koetietutkimuksen yhteydessä 1950-luvun lopulla selvitettiin ajopaneelitutkimuksella tien pinnan vaurioiden merkitystä ajajan ja ajoneuvon matkustajan tuntemaan ajomukavuuteen eli tien toiminnalliseen kuntoon. Subjekttiivinen kuntoarviointi tehtiin viisiportaisella asteikolla (kuva 55). Kuntoarvioinnin rinnalla tehtiin fyysisiä mittauksia. Kuntoarvioinnin ja mittausten välille saatiin ns. palvelutasoindeksi (Present Serviceability Index), mitä voi-

daan käyttää tien toiminnallisen kunnan mittana. Myös ajoneuvokustannukset riippuvat palvelutasoindeksistä.



Kuva 55. Palvelutasoindexin arvosteluasteikko [AASHTO, 1962, OECD, 1987].

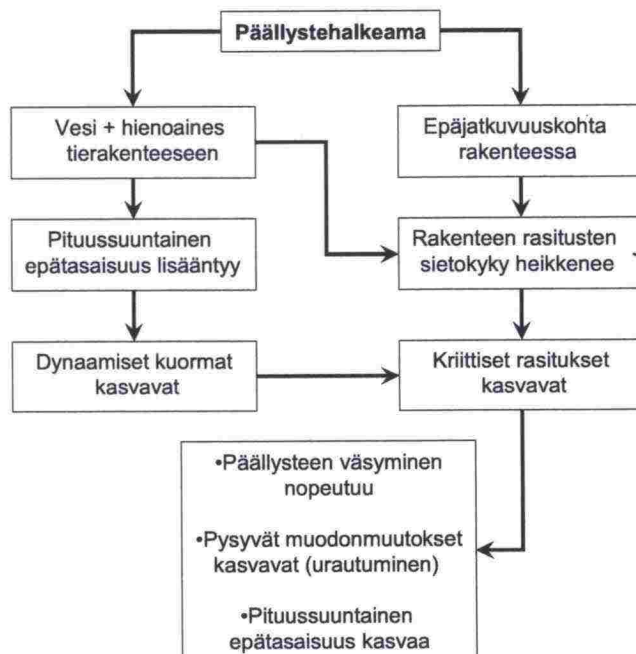
Tärkein palvelutason vaikuttava tekijä on pituussuuntainen epätasaisuus, mitä kuvataan yleensä IRI-arvolla. Urasyvyys, halkeamat ja paikkaukset vaikuttavat myös palvelutason.

#### 5.4.3 Vaurioiden rakenteellinen merkitys

Vaurioitumisen rakenteellista merkitystä tarkasteltaessa on otettava huomioon, että tierakenne toimii aina yhtenä kokonaisuutena eli muutos jossakin kerroksessa vaikuttaa koko rakenteen toimintaan. Tällöin yksittäinen vaurio nopeuttaa yleensä myös toisen tyyppisten vaurioiden muodostumista. Esimerkiksi halkeama nopeuttaa päällysteen väsymistä, urautumista ja pituussuuntaisen epätasaisuuden kasvua (kuva 56).

Tasaisellakin tiellä halkeama muodostaa tiehen epäjatkuvuuskohdan, missä liikennekuormituksen aiheuttama rasitus on suurempi kuin muualla. Rasitusvaikutusta lisää edelleen se, että halkeamat ulottuvat yleensä syvälle tierakenteeseen. Tällöin liikennekuormituksen aiheuttamat kriittiset rasitukset (kohta 3.2) tierakenteessa kasvavat. Halkeamien kautta tierakenteeseen pääsee kosteutta ja jossain määrin myös hienoainesta, mikä heikentää rakenteen rasitusten sietokykyä. Tämä edelleen kasvattaa kriittisiä rasituksia.

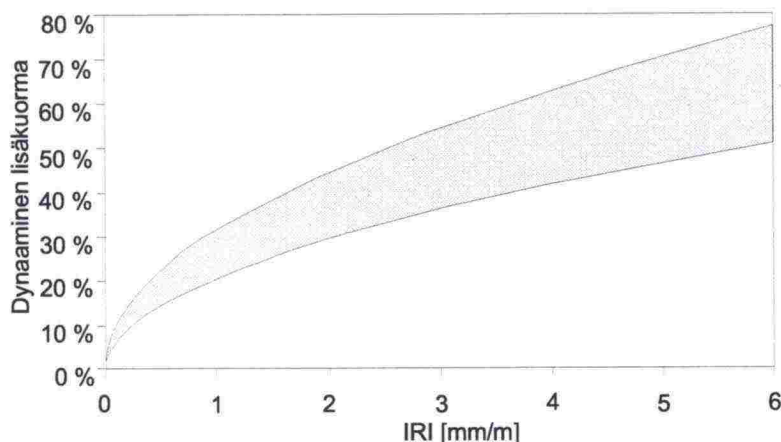




Kuva 56. Halkeaman vaikutus tierakenteen vaurioitumiseen.

Talvella halkeaman reunat nousevat rakenteeseen päässeen veden jäätyessä ja kesällä ne painuvat muuta tietä alemmalle tasolle. Molempina ajankohtina syntyy pituussuuntaista epätasaisuutta, mikä kasvattaa liikennekuormituksen aiheuttamia rasituksia ja nopeuttaa tien vaurioitumista.

Ylittäessään epätasaisen tien kohdan liikkuva ajoneuvo joutuu pystysuuntaiseen liikkeeseen, mikä synnyttää dynaamisia lisäkuormia, joiden suuruus lisääntyy epätasaisuuden kasvaessa (kuva 57). Dynaamisten lisäkuormien maksimi-arvot ovat jo uutta tietä vastaavalla tasaisuudella 20 - 30 % staattisen kuormituksen arvosta ja kasvavat vanhalla päällysteellä 50 % suuruusluokkaan.



Kuva 57. Kuorma-auton dynaamisten maksimilisäkuormien riippuvuus tien epätasaisuudesta [Laitinen ja Halonen, 1993].

Dynaamisen kuormituksen kasvu nopeuttaa päällysteen väsymistä sekä eri rakennekerrosten ja alusrakenteen pysyvien muodonmuutosten kehittymistä. Myös pituussuuntainen epätasaisuus lisääntyy dynaamisen kuormituksen kasvaessa.

Poikkisuuntainen epätasaisuus eli urautuminen vaikuttaa tierakenteen muuhun vaurioitumiseen kuvan 56 kaltaisesti. Uriin kertyvä vesi tunkeutuu helposti alapuolisiin kerroksiin halkeamien ja harvojen päällystekohtien kautta. Veden tunkeutumista päällysteen läpi lisää se, että pyöräkuorma saa aikaan urassa olevaan vesikalvoon huomattavan paineen. Kosteuden lisääntyessä sitomattomien kerrosten ja sitä kautta koko tierakenteen rasitusten sietokyky alenee, mikä nopeuttaa eri tyyppisten vaurioiden kehittymistä.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Suomen tiestö oli 1950-luvun alkupuolella sorapintaista ja huonossa kunnossa. Tiestön kunnostaminen ja rakentaminen käynnistyivät suuressa mitakaavassa 1950-luvun lopulla erityisesti päällystämisen ollessa voimakasta aina 1990-luvulle saakka. Nykyisin yleisistä teistä on päällystetty lähes kaksi kolmasosaa. Laman seurauksena 1990-luvulla tiestön kehittäminen hidastui ja keskittyi pääasiassa päätieverkolle.

Viimeisen neljäkymmenen vuoden aikana tieliikenteen kuljetussuorite on lähes viisinkertaistunut. Vaikka kuljetussuorite ei enää 1990-luvulla juurikaan lisääntynyt, liikenteen aiheuttaman tiestön rasituksen kasvu jatkui kuitenkin voimakkaana. Tämä johtuu siitä, että kuormakoko on kasvanut ja kuljetuksissa käytetään entistä raskaampaa kalustoa. Jos tulevaisuudessa kuljetussuorite lisääntyy ja siirtyminen yhä raskaampaan kalustoon jatkuu, tulee tiestön rasitus lisääntymään erittäin voimakkaasti.

Vilkasliikenteiset päätiet ovat yleensä vahvarakenteisia, kun taas vähäliikenteisten päällystettyjen teiden rakenteet ovat pääosin heikkoja ja osittain jopa ns. rakentamattomia, missä vanhoille sorateille on ennen päällystämistä lisätty ainoastaan hieman luonnonsoraa tai murskattua materiaalia. Koska sekä kuormitukset että rakenteet vaihtelevat tiestöllä huomattavasti, myös tierakenteiden kuormituskäyttäytyminen ja sitä kautta vaurioituminen on erilaista.

Ilmasto-olosuhteiden vaihtelun vuoksi tierakenteen vaurioituminen vaihtelee eri vuodenaikoina huomattavasti. Liikennekuormituksen aiheuttama vaurioituminen painottuu pääosin kevätolosuhteisiin, jolloin tierakenne on roudan sulamisen vuoksi heikoimmillaan johtuen ylimääräisestä kosteudesta ja routineen alusrakenteen alentuneesta tiiviyydestä.

Kesällä päällysteen lämpötilan ollessa korkea vaurioita syntyy päällysteen alhaisesta jäykkyydestä johtuen. Sen sijaan talvella, tierakenteen ollessa jäässä, liikennekuormituksen vaikutus vaurioitumiseen on vähäistä. Talvella syntyvät vauriot kuten halkeamat ja pituussuuntainen epätasaisuus johtuvat pääasiassa alusrakenteen routimisen aiheuttamista epätasaisista routanousuista ja lämpötilamuutosten aiheuttamista termisistä jännityksistä.

Tien pinnalla näkyvät vauriot voidaan luokitella halkeamiin, pituus- ja poikisuuntaiseen epätasaisuuteen sekä päällysteen hajoamisvaurioihin. Näihin johtavia syitä on useita kuten päällysteen väsyminen, pysyvät muodonmuutokset, routanousujen aiheuttamat halkeamat, pakkaskatkojen muodostuminen, heijastushalkeilu sekä nastarenkaiden aiheuttama kuluminen.

Tierakenteen kuormituskäyttäytyminen on erittäin monisäikeinen kokonaisuus, johon vaikuttavat tierakenteen ominaisuudet, kuormitukset ja olosuhteet. Tierakenne toimii aina kokonaisuutena, mistä syystä yhdenkin tekijän muuttuminen vaikuttaa koko rakenteen käyttäytymiseen. Tämän vuoksi yk-



sittäinen vaurio nopeuttaa yleensä myös toisen tyyppisten vaurioiden muodostumista.

Tavanomaisella tierakenteella kuormituskestävyyden kannalta kriittisiksi tekijöiksi ovat käytännössä osoittautuneet liikennekuormituksesta sidottujen kerrosten alapintaan muodostuvat vetojännitykset ja -muodonmuutokset sekä ylimpään sitomattomaan kerrokseen ja alusrakenteeseen kohdistuvat puristusrasitukset. Mikä tai mitkä rasitukset ovat kussakin tapauksessa kriittisiä, riippuu tierakenteesta ja liikenteestä.

Paksupäällysteisillä (> 80 mm) vahvarakenteisilla teillä, joilla liikennemäärät ovat suuria, tärkeimmät vaurioitumisen syyt ovat nastarengaskuluminen ja päällysteen väsyminen. Termisistä rasituksista tai routimisesta johtuva halkeilu saattaa olla myös merkittävää. Ohutpäällysteisillä vähäliikenteisillä teillä tärkeimmät vauriot ovat puolestaan ylimmän sitomattoman kerroksen tai alusrakenteen pysyvät muodonmuutokset sekä alusrakenteen routimisen aiheuttamat päällystehalkeamat ja pituussuuntainen epätasaisuus.

Päällystetyn tiestön kunto on tällä hetkellä keskimäärin suhteellisen hyvä, mutta varsinkin ohutpäällysteisellä tiestöllä on osuuksia, jotka ovat erittäin huonossa kunnossa. Pituus- ja poikkisuuntaisen epätasaisuuden osalta tiestöllä ei ole tapahtunut heikkenemistä viime vuosina. Sen sijaan erilaiset pintavauriot varsinkin pituus- ja poikkisuuntaiset halkeamat ovat lisääntyneet.

Pitkällä aikavälillä nykyisin käytettävillä suhteellisen keveillä korjaustoimenpiteillä päällystetyn tiestön kunto ei tule pysymään nykyisellä tasolla. Tiestön kunto tulee väistämättä heikkenemään johtuen pituus- ja poikkisuuntaisten halkeamien lisääntymisestä ja siitä aiheutuvasta tiestön rakenteellisen kunnan yleisestä rappeutumisesta. Jos päällystetyn tiestön kunto halutaan pitää nykyisellä tasolla, ylläpito- ja korjaustoimenpiteitä tulee lisätä.

## 7 KIRJALLISUUSLUETTELO

AASHTO. 1962. The Aasho Road test. Report 7 Summary Report. Highway Research Board. Special Report 61G.

Belt, J. 1997. Sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen jäännösmoduulit ja deformatuminen. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja 15/1997. Helsinki.

Belt, J. 1999. Kestoikä tutkimus. Loppuraportti. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion tutkimus selostuksia 2/1999. Oulu.

Belt, J., Lämsä, V.P., Liimatta, L., Ehrola, E. 2000a. Kevytpäällysteteiden vauriomallien ja mitoitusmenetelmien kehittämisen perusteet. Tielaitoksen selvityksiä 18/2000. Helsinki.

Belt, J., Lämsä, V.P., Ehrola, E. 2000b. Sitomattoman kantavan kerroksen pysyvät muodonmuutokset. Tielaitoksen selvityksiä 60/2000. Helsinki.

Belt, J., Lämsä, V.P., Ehrola, E. 2001. Kevytpäällysteisten teiden rakenteen parantamisen mitoitusmenettely. Tiehallinnon selvityksiä 85/2001. Helsinki.

Blomberg, T. 1990. Bitumit. Neste Oy ja Rakentajain Kustannus Oy.

Brown, S.F. 1993. Introduction to Pavement Design. Bituminous Pavements: Materials, Design and Evaluation. Oulun yliopiston Tie- ja liikennetekniikan laboratorion julkaisuja 22. Oulu.

Djårf, L., Wiman, L.G., Carlsson, H. 1996. Dimensionering vid nybyggnad. Utformning av ett användarvänligt mekanistiskt/empiriskt dimensioneringssystem för svenska förhållanden. VTI meddelande Nr 778 -1996.

Ehrola, E. 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy. Helsinki.

Gandahl, R. 1974. Tjälisolerande material i vägar. VTI Rapport No 40. Stockholm.

Haas, R. C. G., Phang, W. A. 1988. Relationships between Mix Characteristics and Low Temperature Pavement Cracking. Proc. Assn Asphalt Paving Technol. 57.

Haas, R. C. G., Vinson, T. S., Janoo, V. C. 1989. Summary Report on Low Temperature and Thermal Fatigue Cracking. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, DC.

Heikkilä, J. 1982. Roudan aiheuttama pituushalkeama. Diplomityö. Oulu.

Huang, Y.H. 1993. Pavement Analysis and Design. Prentive-Hall, Inc.

Huhtala, M. 1979. Päälysteiden plastiset deformaatiot. VTT:n tiedonanto 49. Espoo.

Kolisoja, P. 1996. Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet – Vuoden 1995 kokeet. Tielaitoksen selvityksiä 34/1996. Helsinki.

Laitinen, V., Halonen, P. 1993. Teiden tasaisuusmittareiden vertailu. Tielaitoksen selvityksiä 40/1993. Helsinki. VTT/TGL.

Lampinen, A. 1993. Kestopäälysteiden urautuminen. VTT julkaisuja 781. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo.

Lekarp, F. 1997. Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials. Licentiate Thesis. Kungliga Tekniska Högskolan.

Liimatta, L., Ehrola, E. 1999. Analyttisessä mitoituksessa käytettävät asfalttipäälysteen jäykkyydet ja väsymismallit. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja 50/1999. Helsinki.

Lämsä, V.P. 1999. Vuoden 1999 kenttämittaukset kevytpäälysteisillä teillä. Työraportti. Oulu.

Lämsä, V.P., Liimatta, L., Belt, J. 2000. Täydentävät kenttämittaukset vuonna 2000 kevytpäälysteisillä teillä. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja 46/2000. Helsinki.

Lämsä, V.P. 2001. Päälystetyn tiestön mitattu kunto. Tiehallinnon selvityksiä 82/2001. Helsinki.

Masonen, J., Hänninen, M. 1995. Pikeä, hikeä, autoja. Tiet, liikenne ja yhteiskunta. Tielaitos. Helsinki.

Myre, J., 1993. Fatigue Cracking. Bituminous Pavements: Materials, Design and Evaluation. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion julkaisuja 22.

Nilsson, R. 2001. Viscoelastic Pavement Analysis Using VEROAD. Doctoral Thesis. Kungliga Tekniska Högskolan.



- Nordal, R.S., Refdal, G. 1989. Frost Protection in Design and Construction. VTT Symposium 95. Frost in Geotechnical Engineering, Volume 2. Int. Symp. 13-15.3.1989, Saariselkä, Finland. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo.
- Nunn, M. E. 1989. An Investigation of Reflective Cracking in composite pavements in The United Kingdom. Proceedings Conference on Reflective Cracking in Pavements. Liege.
- OECD. 1987. Pavement Management Systems. Road Transport Research.
- OECD. 1988. Heavy Trucks, Climate and Pavement Damage. Report prepared by an OECD scientific experts group. Road Transport Research. Paris.
- PANK ry. 2000. Asfalttinormit 2000. Päällystealan neuvottelukunta.
- PIARC 1995. Bituminous Materials With A High Resistance To Flow Rutting. PIARC Technical committees on Flexible and concrete roads. Paris.
- Rahiala, J. 1988. Maabetoni ja betonipäällysteet...käytössä maailmalla sopivatko Suomeen?...Rakennusaineteollisuusyhdistys. Tie- ja vesirakennushallitus. Betoniprojekti. Turku.
- Ryynänen, T. 2000. Instrumentoidun tierakenteen mittaukset. Ympäristötekijät 1998-1999. Tielaitoksen selvityksiä 42/2000. Helsinki.
- Saarenketo, T., Kolisoja, P., Vuorimies, N., Ylitapio, S. 2001. Kantavan kerroksen murskeen imupaine- ja muodonmuutosominaisuudet. Tiehallinnon selvityksiä 9/2001. Helsinki.
- Smith, R. B., Brooker, T. N. ASPAC 92. The Laser Road Surface Tester - an effective measure of pavement condition. IRF/ARF Asia Pacific Regional Road Conference.
- Spoof, H. 1992. Asfaltin väsyminen. Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma ASTO 1987-1992. VTT, Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio n:o 74. Espoo.
- Tie- ja vesirakennushallitus. 1985. Teiden suunnittelu, IV tien rakenne. Helsinki.
- Tie- ja vesirakennushallitus. 1987. Akselipainotutkimus 1986. Helsinki.
- Tiehallinto. 2001. Tietilasto 2000. Tiehallinnon selvityksiä 59/20001. Helsinki.

Tielaitos. 2000. Akselimassatutkimus 1998-1999. Tielaitoksen selvityksiä 6/2000. Helsinki.

Ullidtz, P. 1987. Pavement Analysis. Developments in Civil Engineering, 19. Lyngby, Denmark.

Virtala, P., Toivonen, T., Prokkola, R. 2000. Päällysteiden rappeutuminen hidastuu. Tiennäyttäjä 5/2000.

Wågberg, L-G. 1991. Bärä eller brista. Handbok i tillståndsbedömning av belagda gator och vägar. Svenska Kommunförbundet, väg- och trafikinstitutet och vägvärket.

ISSN 1457-9871  
ISBN 951-726-881-5  
TIEH 3200747